

# **Niedertemperaturepitaxie zur Herstellung von SiGe/Si-HBTs**

Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik  
und Wirtschaftsingenieurwesen  
der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieurs  
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Diplom-Physiker  
Dirk Wolansky

geboren am 19. September 1965 in Dessau

Vorsitzender: Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Arnim Nethe

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Falter

Gutachter: Prof. Dr. sc. nat. H. Jörg Osten

Gutachter: Prof. Dr. sc. nat. Hans Richter

Tag der mündlichen Prüfung: 7. November 2003

|  |            |
|--|------------|
| <b>Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Symbole .....</b>   | <b>III</b> |
| <b>1    Einleitung .....</b>   | <b>1</b>   |
| <b>2    Grundlagen .....</b>   | <b>3</b>   |
| 2.1 SiGe/Si-Heteroschichtsysteme .....   | 3          |
| 2.2 Epitaxie von SiGe/Si-Heteroschichtsystemen .....   | 4          |
| 2.3 SiGe-Heterobipolartransistor (HBT) .....   | 6          |
| 2.4 Statistische Methoden .....  | 9          |
| <b>3    Experimentelles .....</b>  | <b>11</b>  |
| 3.1 Prinzipaufbau der verwendeten LPCVD- und RPCVD-Epitaxieanlagen .....   | 11         |
| 3.2 Epitaktische Abscheidung von SiGe-Modellstrukturen und HBT-Schichtstapeln .....  | 12         |
| 3.3 Aufbau der untersuchten HBTs .....   | 16         |
| 3.4 Charakterisierung von HBTs, Teststrukturen und Epitaxieschichten.....  | 17         |
| 3.4.1 Charakterisierung von HBTs und elektrischen Teststrukturen.....  | 17         |
| 3.4.2 Charakterisierung von Epitaxieschichten.....   | 19         |
| <b>4.   Kinetik der epitaktischen Abscheidung von Silizium- und SiGe-Schichten .....</b>                                       | <b>22</b>  |
| 4.1 Siliziumabscheidung .....  | 22         |
| 4.2 SiGe-Abscheidung .....   | 24         |
| <b>5    Bewertung von HBT-Parametern .....</b>   | <b>29</b>  |
| 5.1 Bewertung der Siliziumdeckschichtabscheidung anhand der Emitter-Basis-<br>Raumladungsweite $X_{EB}$ .....                  | 29         |
| 5.1.1 $X_{EB}$ -Mittelwerte und -Streuungen für verschiedene HBTs und<br>Epitaxieverfahren .....                               | 29         |
| 5.1.2 Kritische Einflußfaktoren auf $X_{EB}$ .....   | 31         |
| 5.2 Bewertung der epitaktischen Bordotierung der SiGe-Schichten anhand der<br>inneren Basis-Schichtwiderstände $R_{SBI}$ ..... | 36         |
| 5.2.1 $R_{SBI}$ -Mittelwerte und -Streuungen für verschiedene HBTs und<br>Epitaxieverfahren .....                              | 36         |
| 5.2.2 Kritische Einflußfaktoren auf die ermittelten $R_{SBI}$ -Streuungen.....   | 40         |
| 5.3 Bewertung von B- und Ge-Profilen anhand der Kollektorströme $I_C$ .....  | 46         |
| 5.3.1 $I_C$ -Mittelwerte und -Streuungen für mittels LPCVD hergestellte SiGe-HBTs ...  | 46         |
| 5.3.2 Vergleich der $I_C$ -Mittelwerte und -Streuungen von LPCVD-basierten mit<br>denen RPCVD-basierter HBTs .....             | 50         |

|  |           |
|--|-----------|
| 5.3.3 $I_C$ -Mittelwerte und -Streuungen für mittels RPCVD hergestellte SiGeC-HBTs..                                 | 51        |
| 5.4 Bewertung der epitaktischen Schichtqualität anhand Leckstrom begrenzter Ausbeuten.....                           | 54        |
| 5.4.1 Leckstrom begrenzte Ausbeute von HBT-Arrays im Vergleich zu Referenzdaten.....                                 | 54        |
| 5.4.2 Kollektor-Emitter- und Emitter-Kollektor-Leckströme von LPCVD-HBTs und deren Korrelation zu Defektdichten..... | 55        |
| <b>6 Zusammenfassung .....</b>   | <b>58</b> |

## Literaturverzeichnis

### **Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Symbole**

#### **Abkürzungen**

|        |  |
|--------|--|
| BiCMOS | Bipolar-CMOS   |
| CMOS   | Complementary MOS (Komplimentäre MOS)  |
| CVD    | Chemical Vapor Deposition (Chemische Dampfphasenabscheidung)   |
| Ge     | Germanium  |
| HBT    | Heterojunction Bipolar Transistor (Heterobipolartransistor)  |
| IHP    | Innovations for High Performance microelectronics<br>(ehemals: Institut für Halbleiterphysik Frankfurt (Oder)) |
| LPCVD  | Low Pressure CVD (Niederdruck CVD)   |
| MOS    | Metal Oxide Semiconductor (Metal-Oxid-Halbleiter)  |
| OEG    | obere Eingriffsgrenze  |
| RPCVD  | Reduced Pressure CVD (Druckreduzierte CVD)   |
| RTA    | Rapid Thermal Anneal (Schnelle thermische Ausheilung )   |
| Si     | Silizium   |
| SiGe   | Silizium-Germanium (Kurzform von $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ mit Germaniumgehalt x)                           |
| SIMS   | Secondary Ion Mass Spectroscopy (Sekundärionen Massenspektroskopie)  |
| TED    | Transient Enhanced Diffusion (beschleunigte Diffusion )  |
| UEG    | untere Eingriffsgrenze   |
| UHVCVD | Ultra High Vacuum CVD (Ultrahochvakuum CVD)  |
| XRD    | X Ray Diffraction (Röntgenbeugung)   |

#### **Verwendete Symbole**

|                        |   |
|------------------------|---|
| $A_E$                  | Emitterfläche   |
| $A_B$                  | Basisfläche   |
| $d_{\text{Si-Cap}}$    | Si-Deckschichtdicke (HBT)                                       |
| $d_{\text{SiGe}}$      | SiGe-Schichtdicke   |
| $d_{\text{Si-Puffer}}$ | Si-Pufferschichtdicke   |
| $E_a$                  | Aktivierungsenergie   |
| $f_T$                  | Transitfrequenz   |
| $f_{\text{max}}$       | maximale Schwingfrequenz  |
| $I_B$                  | Basisstrom  |
| $I_C$                  | Kollektorstrom  |
| $I_{\text{CE0}}$       | Kollektor-Emitter-Leckstrom                                     |
| $I_{\text{EC0}}$       | Emitter-Kollektor-Leckstrom                                     |
| $O_{p3}$               | oberes Percentil (äquivalent zu $3\sigma$ der Normalverteilung) |

## Abkürzungen und Symbole

---

|                    |   |
|--------------------|---|
| $p_{\text{GeH}_4}$ | Germanpartialdruck  |
| $p_{\text{ges}}$   | Gesamtdruck   |
| $p_{\text{H}_2}$   | Wasserstoffpartialdruck                                       |
| $p_{\text{SiH}_4}$ | Silanpartialdruck   |
| $R$                | Abscheiderate   |
| $R_s$              | Schichtwiderstand   |
| $R_{\text{Sbi}}$   | innerer Basisschichtwiderstand                                |
| $V_{\text{BE}}$    | Basis-Emitter-Spannung  |
| $V_{\text{CE}}$    | Kollektor-Emitter-Spannung                                    |
| $U_{p3}$           | unteres Percentil (äquivalent $3\sigma$ der Normalverteilung) |
| $x$                | Germaniumgehalt   |
| $X_{\text{EB}}$    | Emitter-Basis-Raumladungsweite                                |
| $\beta$            | Stromverstärkung  |

## 1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit befaßt sich mit der epitaktischen Abscheidung von SiGe/Si-Heteroschichten zur Herstellung von npn SiGe/Si-Heterobipolartransistoren (SiGe-HBTs). Insbesondere wird untersucht, ob bei Nutzung von Epitaxieprozessen auf Basis von Low Pressure Chemical Vapor Deposition (LPCVD) und Reduced Pressure Chemical Vapor Deposition (RPCVD) die hohen Anforderungen an Schichtabscheidungen, die wesentlich die elektrischen Parameter der Transistoren prägen, unter Anlegung industriüblicher Maßstäbe erfüllt werden können.

Für die Herstellung von SiGe-HBTs, wie sie insbesondere für Hochfrequenzanwendungen genutzt werden, muß der Epitaxieprozeß folgendes leisten [1]:

1. Einstellung der Bor- und Germanium-Profile im Basisgebiet des Transistors mit sehr guter Homogenität und Reproduzierbarkeit
2. Realisierung sehr steiler Bor-Profile über große Konzentrationsbereiche
3. Hohe Kristalline Perfektion von Si- und SiGe-Schichten
4. Hoher Scheibendurchsatz

Das erste Epitaxieverfahren, das diesen Anforderungen gerecht wurde, war die Chemische Gasphasenabscheidung unter Hochvakuumbedingungen (UHVCVD) [2]. Allerdings hat die UHVCVD-basierte Epitaxie folgende Nachteile:

- Hoher technischer Aufwand zur stabilen Gewährleistung der UHV-Bedingungen mit daraus resultierenden Problemen hinsichtlich Prozeßverfügbarkeit
- Begrenzung der Prozeßtemperatur auf Werte unter 800°C. Damit ist die Wirksamkeit der Wasserstofftemperung eingeschränkt, die bei Temperaturen > 800°C sehr effektiv zur Entfernung von Sauerstoff- und Kohlenstoffkontaminationen vom Si-Substrat eingesetzt werden kann. Außerdem sind übliche in situ Hochtemperaturreinigungen des Reaktors zur Reduzierung von Memoryeffekten (Dotandenverschleppung über die Reaktorwände) nicht anwendbar.

Diese Nachteile existieren bei den in dieser Arbeit untersuchten LPCVD- und RPCVD-Epitaxieverfahren nicht. Beide Verfahren ermöglichen insbesondere schnelle Änderungen der Prozeßtemperatur in einem Bereich von 300°C bis 1100°C. Der Scheibendurchsatz beider Verfahren ist ähnlich dem des UHVCVD-Verfahrens, obwohl die genutzten Epitaxieanlagen Einscheibenreaktoren besitzen.

Die vorliegende Arbeit entstand in den letzten sechs Jahren während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im IHP Frankfurt(Oder). Bei der Themenaufnahme im Jahre 1996 war noch nicht bewiesen, ob die in dieser Arbeit untersuchten LPCVD- und RPCVD-Epitaxieverfahren die obigen Anforderungen erfüllen. Mittlerweile hat sich das RPCVD-Verfahren in der Industrie durchgesetzt, wozu einige in dieser Arbeit dargestellten Ergebnisse und weitere Arbeiten des IHP maßgeblich beigetragen haben [3].

Die Hauptergebnisse dieser Arbeit lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Unter Verwendung der RPCVD-Epitaxie lassen sich SiGe-HBTs herstellen, deren wesentliche elektrische Parameter Kollektorstrom ( $I_C$ ), innerer Basisschichtwiderstand ( $R_{SBI}$ ) und Emitter-Basis-Raumladungsweite ( $X_{EB}$ ) nur geringe Streuungen von Wafer zu Wafer (Reproduzierbarkeit) und über den Wafer (Homogenität) aufweisen. Die  $I_C$ - und die  $R_{SBI}$ -Streuungen sind geringer als die entsprechenden Streuungen von UHVCVD-SiGe-HBTs [1, 4].
2. Die mit LPCVD-Epitaxie hergestellten HBTs weisen höhere  $I_C$ - und ähnliche  $R_{SBI}$ -Streuungen auf als die mit UHVCVD hergestellten Transistoren.
3. Die Abscheidetemperatur ist der Prozeßparameter des LPCVD- und des RPCVD-Epitaxieverfahrens mit dem größten Einfluß auf die untersuchten HBT-Parameter.

4. Die Gasströmungsverhältnisse haben insbesondere beim LPCVD-Reaktor Einfluß auf die Homogenität des Boreinbaus in SiGe-Schichten.
5. Sowohl mittels LPCVD- als auch mittels RPCVD-Epitaxie lassen sich HBTs mit sehr niedrigen Kollektor-Emitter-Leckströmen herstellen. Insbesondere wurden in beiden Fällen ähnlich hohe Leckstrom begrenzte Transistorausbeuten erhalten, wie sie für UHVCVD-basierte HBTs bekannt sind.

Die Arbeit ist wie folgt aufgebaut.

In Kapitel 2 werden einige Grundlagen zu SiGe/Si-Heteroschichten und deren epitaktischen Wachstums dargelegt, und es wird die Funktionsweise eines SiGe/Si-HBTs erläutert. Außerdem werden die zur Prozeßbewertung verwendeten statistischen Methoden eingeführt.

In Kapitel 3 werden die verwendeten Epitaxieanlagen sowie typische Epitaxieprozeßzyklen zur Herstellung von Modellstrukturen und HBTs beschrieben. Weiterhin wird der Aufbau der untersuchten HBTs erklärt.

Mit der Kinetik der epitaktischen Abscheidung von Si- und SiGe-Schichten unter LPCVD- und RPCVD-Bedingungen befaßt sich Kapitel 4. Insbesondere werden die Zusammenhänge zwischen Abscheideraten, der Ge- und der B-Konzentration in den Schichten und den Prozeßparametern Temperatur und Gaspartialdruck diskutiert.

Im Hauptteil der Arbeit (Kapitel 5) werden die Homogenität und Reproduzierbarkeit der Emitter-Basis-Raumladungsweite, des inneren Basisschichtwiderstandes und des Kollektorstroms von LPCVD- und RPCVD-HBTs mit statistischen Methoden bewertet. Die resultierenden Kennwerte werden mit publizierten Streuungen der entsprechenden Parameter von UHVCVD-HBTs verglichen. Außerdem werden die wesentlichen Einflußfaktoren des Epitaxieprozesses auf die HBT-Parameter bestimmt und Unterschiede zwischen LPCVD- und RPCVD-Epitaxie analysiert. Weiterhin werden Leckstrom begrenzte Ausbeuten von HBTs bewertet, um Aussagen zur kristallinen Perfektion der SiGe/Si-Epitaxieschichten zu gewinnen.

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 6.

## 2 Grundlagen

### 2.1 SiGe/Si-Heteroschichtsysteme

#### **Verspannte SiGe/Si-Schichten**

Silizium und Germanium besitzen die gleiche Kristallgitterstruktur und sind miteinander mischbar. Aufgrund dessen lassen sich epitaktische  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ /Si-Heteroschichten herstellen, wobei  $x$  den Germaniumanteil in der Mischschicht kennzeichnet.

Die Gitterkonstante von Germanium  $a_{\text{Ge}}$  ist mit 5,66 Å um 4,2 % größer als die vom Silizium ( $a_{\text{Si}}=5,43$  Å). Für unverspannte  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ -Schichten kann die Gitterkonstante  $a_{\text{SiGe}}$  in erster Näherung nach der Vegardschen Regel:

$$a_{\text{SiGe}} = a_{\text{Si}} + x(a_{\text{Ge}} - a_{\text{Si}}) \quad (2.1)$$

für den Germaniumanteil  $x$  mit  $0 \leq x \leq 1$  beschrieben werden [1].

Der Parameter der Fehlanpassung ist folgendermaßen definiert

$$f_m = \frac{a_{\text{SiGe}} - a_{\text{Si}}}{a_{\text{Si}}} = 0.042 \cdot x. \quad (2.2)$$

Wenn eine SiGe-Schicht epitaktisch auf einem Si-Substrat abgeschieden wird, so paßt sich seine laterale Gitterkonstante  $a_{\parallel}$  zunächst an die des Si-Substrates ( $a_{\parallel}=a_{\text{Si}}$ ) an. Unter dieser Bedingung wächst die SiGe-Schicht gitterangepaßt (pseudomorph) auf die unterliegende Si-Schicht (siehe Abbildung 2-1a).

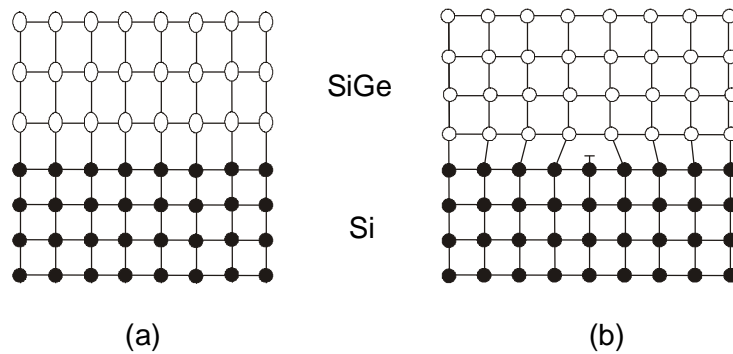


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung vom pseudomorphen (a) und inelastisch relaxiertem (b) (offene Bindung) Wachstum von SiGe auf Si-Substrat

In einer pseudomorphen Schicht sind die Gitterkonstanten ( $a_{\perp}, a_{\parallel}$ ) und die Gitterverspannungen ( $\varepsilon_{\perp}, \varepsilon_{\parallel}$ ) senkrecht und parallel zur Substratoberfläche gegeben durch

$$\begin{aligned} a_{\perp} &= a_{\text{Si}} \cdot (1 + k_v \cdot f_m), & a_{\parallel} &= a_{\text{Si}}, \\ \varepsilon_{\perp} &= k_v \cdot \frac{a_{\perp} - a_{\text{Si}}}{a_{\text{Si}}}, & \varepsilon_{\parallel} &= -f_m, & k_v &= \frac{1 + \nu}{1 - \nu}. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Hierbei ist  $\nu$  die Poissonzahl. Damit die elastische Energie der auf dem Si-Substrat pseudomorph gewachsenen SiGe-Schicht minimal ist, ist die Gitterkonstante in Wachstumsrichtung vergrößert, so daß ein tetragonal verzerrtes Gitter entsteht (Abbildung 2-1a). Nimmt die SiGe-Schichtdicke weiter zu, wird bei einer bestimmten Schichtdicke, der sogenannten kriti-



schen Schichtdicke  $h_c$ , die in der Schicht gespeicherte elastische Energie so groß, daß sich entweder Fehlanpassungsversetzungen gemäß Abbildung 2-1b bilden (Misfits, auch inelastische Relaxation), oder ein Inselwachstum (elastische Relaxation) auftritt. Aus Misfitversetzungen an der Grenzfläche zwischen einer SiGe-Schicht und dem Siliziumsubstrat bilden sich Threading-Versetzungen, die die SiGe-Schicht von der Oberfläche bis ins Substrat durchdringen können [2].

Sowohl die Versetzungsbildung als auch das Inselwachstum reduzieren die Verspannung der SiGe-Schicht, so daß sich die resultierende laterale Gitterkonstante vergrößert. Welcher der beiden Prozesse dominiert, wird durch die Verspannungs-, die Oberflächenenergie und die Energie der Versetzungsbildung bestimmt. Die kritische Schichtdicke  $h_c$  definiert die Dicke, oberhalb der die elastische Verspannung in der Schicht zu einer Relaxation der Schicht führt.

Eine Vielzahl von Modellen wurde aufgestellt [3,4,5,6,7,8,9,10], um diese kritische Schichtdicke theoretisch vorherzusagen. Nach einem Modell von van der Merve [4] bilden sich Versetzungen, wenn der Energiegewinn durch den verursachten Spannungsabbau größer als die Energie ist, die für die Versetzungsbildung erforderlich ist. Das Modell von Matthews und Blakeslee berücksichtigt die Versetzungsbewegung bei der Versetzungsbildung [5]. Dieses Modell sagt etwas größere kritische Schichtdicken als das von van der Merve voraus. Nach Matthews und Blakeslee wird für (100)-Si-Oberflächen die Relation zwischen  $h_c$  und dem Fehlanpassungsparameter  $f_m$  durch folgende Gleichung beschrieben:

$$h_c = \frac{8.69 \cdot 10^{-2}}{f_m} \ln(7.08 h_c) \quad (2.4)$$

Auf Siliziumsubstrat abgeschiedene verspannte SiGe-Schichten haben eine kleinere Bandlücke als Silizium. Diese Bandlücke hängt vom Germaniumgehalt der SiGe-Schicht ab und kann nach People [11] durch folgende Gleichung gut angenähert werden:

$$E_G(x) = 1.16 - 1.02x + 0.52x^2 \quad (2.5)$$

Hierbei sind  $E_G$  die Bandlücke und  $x$  der Germaniumgehalt. Diese Eigenschaft von SiGe-Schichten ermöglicht ein "Bandgapengineering", indem ein bestimmter Bandabstand durch einen entsprechenden Germaniumgehalt einstellbar ist. Auf diese Art und Weise können Heteroübergänge zwischen SiGe- und Si-Schichten erzeugt werden. Solche Heteroübergänge werden beispielsweise in Heterobipolartransistoren (HBTs) angewendet. Sie ermöglichen eine Verbesserung der Hochfrequenzeigenschaften gegenüber Silizium-basierten Transistoren. HBTs sind Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit und werden im Abschnitt 2.3 näher erläutert.

## 2.2 Epitaxie von SiGe/Si-Heteroschichtsystemen

Unter Epitaxie versteht man das geordnete Wachstum einer kristallinen Substanz auf einer anderen. Im Fall der Homoepitaxie sind Schicht- und Substratmaterial identisch. Abweichungen können in Dotanden- und Kontaminationskonzentrationen auftreten. Im Idealfall ist die Grenzfläche zwischen Substrat und Epitaxieschicht so perfekt, daß sie weder mit Hilfe der Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) abzubilden ist, noch durch erhöhte Sauerstoff- und Kohlenstoffkontaminationen mit Sekundärionen Massenspektroskopie (SIMS) nachgewiesen werden kann. Bei der Heteroepitaxie unterscheiden sich Schicht- und Substratmaterial, wie im Fall des in dieser Arbeit untersuchten SiGe/Si-Schichtsystems.

In modernen Silizium-basierten Technologien werden zur epitaktischen Schichtabscheidung vorwiegend CVD-Prozesse benutzt. Diese Prozesse werden aufgrund der unterschiedlichen Abscheidedrücke  $p_{ges}$  in Ultrahigh Vacuum CVD (UHVCVD:  $p_{ges} \sim 0,1 \text{ Pa}$ ), Low Pressure CVD (LPCVD:  $p_{ges} = 1 - 300 \text{ Pa}$ ), Reduced Pressure CVD (RPCVD:  $p_{ges} = 3 - 10 \text{ kPa}$ ) und Atmospheric Pressure CVD (APCVD:  $p_{ges} \sim 10^5 \text{ Pa}$ ) unterteilt [12]. Eine weitere Klassifizierung der CVD-Verfahren erfolgt nach der Steuerung der Abscheidung: Im Fall der Rapid Thermal

CVD (RTCVD) wird die Abscheidung durch schnelle Temperaturänderungen gesteuert. Wird das Schalten der Prozeßgase zur Steuerung der Abscheidung verwandt, handelt es sich um Limited Reaction CVD (LRCVD) [13].

Das UHVCVD-Verfahren für die SiGe-Abscheidung wurde erstmals von Meyerson 1986 beschrieben [14]. Der Vorteil dieses UHVCVD-Verfahrens besteht im sehr guten Grundvakuum, so daß die Konzentration von Kontaminationen wie Sauerstoff und Feuchtigkeit sehr gering ist. Aufgrund dessen können Epitaxieschichten mit geringen Defektdichten abgeschieden werden. Wegen des einfacheren Aufbaus hinsichtlich des Vakuumsystems und eines größeren Temperaturarbeitsbereiches gewinnen RTCVD-[15, 16, 17] und RPCVD-Verfahren [18] zur Abscheidung von SiGe/Si-Heteroschichtsystemen an Bedeutung.

### **Chemische Gasphasenabscheidung (CVD)**

Die chemische Gasphasenabscheidung (CVD) basiert auf Transportprozessen von gasförmigen Ausgangsprodukten sowie deren Reaktionen in der Gasphase und auf der Substratoberfläche. Wenn bei dem CVD-Prozeß die Reaktionen auf der Substratoberfläche dominieren, spricht man vom kinetisch begrenzten Arbeitsregime. In diesem Regime ist die Abscheidung sehr stark von der Temperatur abhängig und wird durch folgende Gleichung beschrieben (siehe Abbildung 2-2) [13, 19]:

$$R = R_0 \cdot e^{-\frac{E_A}{kT}} \quad (2.6)$$

In dieser Arrheniusgleichung ist R die temperaturabhängige Abscheiderate,  $R_0$  die Ratenkonstante,  $E_A$  die Aktivierungsenergie der die Abscheiderate begrenzenden Reaktion, k die Boltzmannkonstante und T die Temperatur.

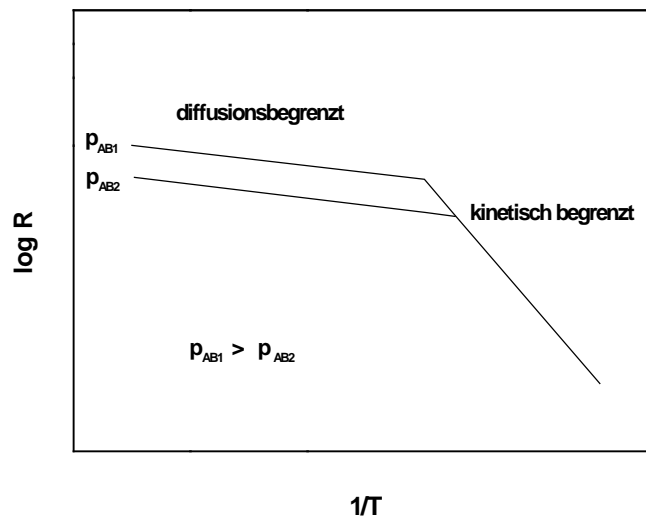


Abbildung 2-2: Abhängigkeit der Abscheiderate von der Temperatur bei unterschiedlichen Partialdrücken des Prozeßgases AB nach [20]

Höhere Temperaturen führen zu schnell ablaufenden Reaktionen auf der Substratoberfläche, so daß der Massentransport der Prozeßgase zur Oberfläche den Abscheidungsprozeß limitiert. So wird die Rate durch die Temperaturabhängigkeit des Diffusionskoeffizienten der Reaktionsgase bestimmt und kann mit folgender Gleichung beschrieben werden [21]:

$$R \sim \sqrt{v} \cdot T^m \cdot \frac{p_{AB}}{p_{ges}}, \quad m \sim 1,75 \quad (2.7)$$

Hierbei ist  $v$  die Gasgeschwindigkeit,  $p_{\text{ges}}$  der Gesamtdruck im Reaktor und  $p_{\text{AB}}$  der Partialdruck des Prozeßgases AB. In diesem diffusionsbegrenzten Regime ist die Abscheiderate nur schwach von der Temperatur abhängig.

### ***CVD-Arbeitsregime für epitaktische SiGe/Si-Schichten***

Die reproduzierbare epitaktische Herstellung von SiGe-Profilen für Heterobipolartransistoren mit Schichtdicken kleiner 30nm mit steilen Borprofilen erfordert Abscheideraten von 1nm/min bis 15nm/min. Diese Raten sind nur im kinetisch begrenzten Abscheideregime zu erreichen (siehe Kapitel 4).

Für epitaktische Abscheidungen im kinetisch limitierten CVD-Regime ergeben sich folgende Anforderungen an die Epitaxieanlagen:

- Eine gute Temperaturhomogenität und -reproduzierbarkeit, weil die Abscheideraten im kinetisch limitierten Bereich eine höhere Temperaturabhängigkeit aufweisen als im diffusionsbegrenzten Bereich (siehe Abbildung 2-2)
- Bei Temperaturen kleiner 900°C sind besonders geringe Feuchtigkeitspartialdrücke erforderlich, um die Oxidbildung und damit ein gestörtes epitaktisches Wachstum zu vermeiden. Beispielsweise fällt der für die Oxidbildung notwendige Feuchtigkeitspartialdruck von 6,6mPa bei 1000°C auf 0,6mPa bei 900°C [22] ab. Bezogen auf einen Gesamtdruck von 200Pa entspricht dieser Feuchtigkeitspartialdruck von 900°C einem Feuchtigkeitsanteil von 3ppm (parts per million).

Durch die Verwendung von Wasserstofftränergas mit Feuchtigkeitsanteilen kleiner 10 ppb (parts per billion) und kleinen Leckraten der verwendeten Epitaxiereaktoren kann nach dem heutigen Stand der Technik die zweite Anforderung auch bei Prozeßtemperaturen kleiner 900°C erfüllt werden.

## **2.3 SiGe-Heterobipolartransistor (HBT)**

Im Jahre 1957 wurde der Heterobipolartransistor (HBT) erstmals von Kroemer beschrieben [23]. Die ersten npn-SiGe-HBTs wurden Ende der 80-er Jahre hergestellt [24, 25].

Die Leistungsfähigkeit von SiGe/Si-HBTs wurde erstmalig von Patton et al. [26, 27] demonstriert, deren HBTs maximale Transistfrequenzen von 75 GHz erreichten. In den letzten 15 Jahren ist die Leistungsfähigkeit von SiGe-HBTs deutlich gesteigert worden. Heute liegen für SiGe-HBTs die maximalen Schwingfrequenzen bei 350 GHz und die maximalen Transistfrequenzen bei 200 GHz [28, 29].

### ***Funktionsweise von SiGe/Si-HBTs und charakteristische Transistorparameter***

In einem SiGe/Si-HBT bestehen das Kollektor- und das Emittergebiet aus Siliziumschichten. Das Basisgebiet wird durch eine SiGe-Schicht gebildet, die eine kleinere Bandlücke  $E_G$  als Si besitzt. Dadurch wird die Ladungsträgerinjektion vom Emitter in die Basis erhöht [30].

Zur Veranschaulichung wird nun das Bändermodell eines npn-SiGe/Si-HBTs betrachtet, das mit dem eines npn-Silizium-Bipolartransistors (BT) mit identischen Dotierungsprofilen verglichen wird. Abbildung 2-3 stellt den Verlauf der Leitungs- und der Valenz-Bandkanten ( $E_L$ ,  $E_V$ ) für den HBT und den BT dar. Aufgrund der p-Dotierung ist die Löcherkonzentration in der Basis des HBTs und des BTs um Größenordnungen höher als die Eigenleitungsdichte, so daß das Fermi-niveau  $E_F(p)$  beider Transistoren sehr dicht an der Valenzbandkante liegt. Infolgedessen äußert sich die kleine Bandlücke der SiGe-Basis in einem geringeren Energieniveau ihrer Leitungsbandkante im Vergleich zur Silizium-Basis. Daraus resultiert beim HBT eine kleinere Leitungsbandbarriere für die aus dem Emitter injizierten Elektronen. Das führt zu einer erhöhten Emittiereffizienz und zu einem Anstieg des Kollektorstroms  $I_C$ .

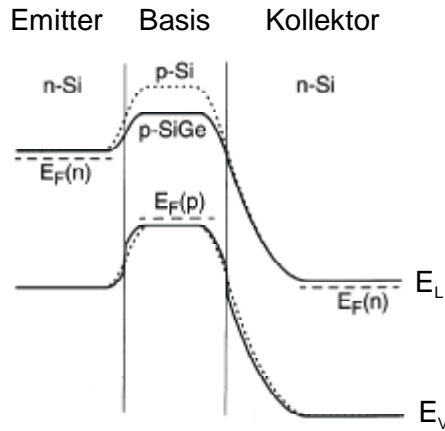


Abbildung 2-3: Banddiagramm eines SiGe-HBTs (ausgezogene Linie) für eine Basis-Emitter-Spannung  $V_{BE}=0,5V$  und eine Kollektor-Emitter-Spannung  $V_{CE}=1,0V$  sowie eines Si-Bipolartransistors (gestrichelte Linie) mit identischem Dotierungsprofil und gleichen Betriebsbedingungen [31]

Unter der Annahme gleicher Basisströme  $I_B$  beider Transistoren besitzt der HBT aufgrund des höheren  $I_C$  eine höhere Stromverstärkung:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad (2.8)$$

Der Kollektorstrom eines Bipolartransistors läßt sich mit der Beziehung

$$I_C = A_E \frac{e^{\frac{qV_{BE}}{kT}} - e^{\frac{-qV_{CB}}{kT}}}{G_B} \quad (2.9)$$

beschreiben. Hierbei sind  $A_E$  die Emitterfläche,  $q$  die Elementarladung,  $V_{BE}$  die Basis-Emitter-Spannung,  $V_{CB}$  die Kollektor-Basis-Spannung und  $G_B$  die Basis-Gummelzahl. Die Basis-Gummelzahl

$$G_B = \int_{y_e}^{y_c} \frac{p(y)}{qD_n(y)n_i^2(y)} dy \quad (2.10)$$

hängt von der ortsabhängigen Löcherkonzentration  $p(y)$  und über das Quadrat der Eigenleitungsdichte  $n_i^2$  vom Verlauf des Bandabstandes im Basisgebiet ab.  $D_n$  kennzeichnet die Diffusionskonstante für Elektronen in der Basis. Die Ortskoordinate  $y$  erstreckt sich über die neutrale Basis vom basisseitigen Rand der Emitter-Basis-Raumladungszone ( $y_e$ ) zum basisseitigen Rand der Basis-Kollektor-Raumladungszone ( $y_c$ ).

Für das Verhältnis der Kollektorströme des HBT und des BT ergibt sich aus den Gleichungen (2.9) und (2.10) unter den Annahmen, daß die Betriebsspannungen und  $D_n$  für SiGe und Si gleich sind, und daß  $n_i$  und  $D_n$  ortsunabhängig sind:

$$\frac{I_C^{HBT}}{I_C^{BT}} = \frac{G_B^{BT}}{G_B^{HBT}} = \frac{n_i^{2HBT}}{n_i^{2BT}} \cdot \frac{\int_{y_e}^{y_c} p(y) dy^{BT}}{\int_{y_e}^{y_c} p(y) dy^{HBT}} \quad (2.11)$$

Für das Verhältnis der Eigenleitungsdichten gilt

$$\frac{n_i^{2HBT}}{n_i^{2BT}} = \frac{(N_C N_V)^{HBT}}{(N_C N_V)^{BT}} \cdot e^{\frac{E_G^{Si} - E_G^{SiGe}}{kT}} \quad (2.12)$$

mit den effektiven Zustandsdichten im Leitungs- und Valenzband ( $N_C$ ,  $N_V$ ). Für eine  $\text{Si}_{0,8}\text{Ge}_{0,2}$ -Schicht mit einer gegenüber Silizium um 150meV reduzierten Bandlücke und einem  $(N_C N_V)^{HBT}/(N_C N_V)^{BT}$  Verhältnis von 0,4 [32] ergibt sich bei 300K damit ein Verhältnis der Quadrate der Eigenleitungsdichten von 130. Damit hätte ein HBT bei gleicher Löcherdosis die 130-fache Stromverstärkung eines Silizium-Bipolartransistors. Für die Anwendung ist aber noch wesentlicher, daß die Löcherkonzentration in der Basis um den Faktor 130 erhöht werden kann, ohne die Stromverstärkung gegenüber dem BT zu reduzieren. Eine Erhöhung der Löcherdosis in der Basis hat eine Reduzierung ihres Schichtwiderstandes zur Folge. Dies ist für das dynamische Verhalten von großem Vorteil.

SiGe/Si-Heterobipolartransistoren werden vornehmlich für Hochfrequenzanwendungen eingesetzt. Aus diesem Grund werden an dieser Stelle zwei wichtige Kenngrößen vorgestellt, die das Hochfrequenzverhalten von Transistoren beschreiben.

### Transitfrequenz $f_T$

Die Frequenz, bei der die Stromverstärkung des Transistors den Wert eins hat, wird als Cutoff-Frequenz oder Transitfrequenz  $f_T$  bezeichnet. Sie ergibt sich aus der Gleichung

$$f_T = \frac{1}{2\pi\tau_{EC}}, \quad (2.13)$$

wobei sich die Emitter-Kollektor-Laufzeit  $\tau_{EC}$  durch die Beziehung

$$\tau_{EC} = \tau_E + \tau_{EB} + \tau_B + \tau_{BC} + \tau_C \quad (2.14)$$

darstellen läßt. Hierbei sind  $\tau_E$ ,  $\tau_B$  und  $\tau_C$  die Laufzeiten der Ladungsträger in den neutralen Gebieten des Emitters, der Basis und des Kollektors.  $\tau_{EB}$  und  $\tau_{BC}$  bezeichnen die Transitzeiten in der Emitter-Basis- und in der Basis-Kollektor-Raumladungszone. Die Laufzeit in der Basis wird durch die Basisweite bestimmt [33].

### Maximale Schwingfrequenz $f_{max}$

Die maximale Schwingfrequenz  $f_{max}$  ist als die Frequenz definiert, bei der die Leistungsverstärkung des Transistors auf den Wert eins abgefallen ist. Diese Frequenz kann mit folgender Gleichung berechnet werden [34, 35]:

$$f_{max} = \sqrt{\frac{f_T}{8\pi R_B C_{BC}}}. \quad (2.15)$$

Demnach wird eine hohe maximale Schwingfrequenz durch eine hohe Transitfrequenz  $f_T$ , einen kleinen Basiswiderstand  $R_B$  und eine kleine Basis-Kollektor-Kapazität  $C_{BC}$  erreicht. Die Möglichkeit, eine viel höhere Löcherdosis in der HBT-Basis im Vergleich zur BT-Basis zu nutzen, führt zu deutlich geringeren  $R_B$  und damit höheren  $f_{max}$  von HBTs.

### 2.4 Statistische Methoden

Statistische Methoden kommen bei der industriellen Halbleiterfertigung zur Überwachung von Produktparametern zum Einsatz. Die große Anzahl von mehreren hundert Prozeßschritten bei der Herstellung integrierter Schaltungen erfordert stabile und reproduzierbare Parameter jedes einzelnen Prozeßschritts. Deshalb werden die Parameter der einzelnen Prozeßschritte und der Schaltungen mittels statistischer Methoden kontinuierlich überwacht.

#### **Grundlagen**

In der Statistik wird zwischen der deskriptiven (beschreibenden) und der induktiven (analytischen) Statistik unterschieden. Die deskriptive Statistik begnügt sich mit der Untersuchung und Beschreibung der ganzen Grundgesamtheit. So wird beispielsweise aus der bekannten Grundgesamtheit auf das Verhalten von Stichproben geschlossen, um Zufallsstrebereiche zu bestimmen.

Im Fall der induktiven Statistik werden nur Stichproben untersucht. Das bedeutet, es wird von den Stichproben induktiv auf die Grundgesamtheit geschlossen. Dabei ist das Ziel, anhand von Stichprobenkennwerten (z.B. Mittelwert  $\bar{x}_q$  und Standardabweichung  $s$ ), eine Aussage über die Parameter der Grundgesamtheit (Mittelwert  $\mu$  und Standardabweichung  $\sigma$ ) zu treffen.

In dieser Arbeit wird zur statistischen Bewertung das Programmpaket qs-STAT der Firma Q-DAS GmbH eingesetzt [36].

#### **Regelkarten**

Die Regelkarte ist ein sehr häufig angewandtes Hilfsmittel der Statistik. Durch sie kann das Verhalten von Prozeß- und Produktparametern bezüglich Lage und Streuung veranschaulicht werden. Dazu werden Kennwerte (Mittelwerte, Standardabweichungen, Urwerte usw.) zur Beurteilung von Lage und Streuung als Funktion der Zeit (bzw. Stichprobennummer usw.) dargestellt und mit Grenzl意思 - den sogenannten Eingriffsgrenzen (untere und obere Eingriffsgrenze, USG, OSG) - verglichen. Auf der Grundlage dieser Vergleiche können Aussagen über die Stabilität von Prozessen und Produkteigenschaften getroffen werden. In Abbildung 2-4 ist als Beispiel eine sogenannte  $\bar{x}$ -s-Regelkarte des inneren Basisschichtwiderstandes  $R_{SBI}$  eines Transistors dargestellt.

Im oberen Teil der Regelkarte ( $\bar{x}$ -Teil) sind die  $R_{SBI}$ -Mittelwerte und im unteren Teil (s-Teil) die  $R_{SBI}$ -Streuungen der jeweiligen Stichproben aufgetragen. Außerdem sind in beiden Teilen die Mittellinien (M) sowie die obere und untere Eingriffsgrenze (OEG, UEG) dargestellt.

Mit der Regelkarte kann sowohl die Prozeßlage ( $\bar{x}$ -Teil) als auch die Streuung (s-Teil) kontinuierlich beurteilt werden. Aus der  $\bar{x}$ -s-Regelkarte läßt sich sehr gut die Wafer-zu-Wafer-Streuung (Reproduzierbarkeit) eines HBT- oder Schichtparameters und seine Streuung über den Wafer (Homogenität) bestimmen.

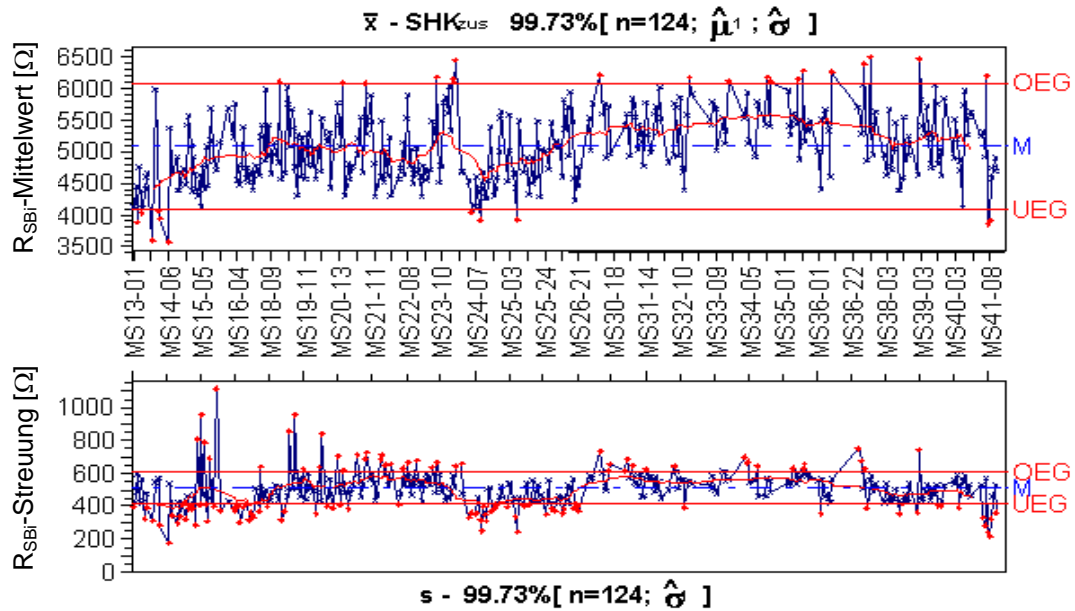


Abbildung 2-4: Beispiel einer  $\bar{x}$ -s Regelkarte für den inneren HBT-Basisschichtwiderstand ( $R_{SBI}$ ) mit Mittellinie (M), oberer Eingriffsgrenze (OEG) und unterer Eingriffsgrenze (UEG)

### Berechnung von Eingriffsgrenzen

Die Eingriffsgrenzen von Regelkarten können einerseits aus den Stichproben (z.B. Shewhart- und Pearsonkarte) und andererseits unter Verwendung von vorgegebenen Toleranzgrenzen (z.B. Annahmekarte) berechnet werden. In der Praxis hat sich die erste Variante durchgesetzt.

Die Verwendung von Regelkarten ist nur dann sinnvoll, wenn deren Eingriffsgrenzen prozeßbezogen ermittelt wurden, d.h. das Prozeßverhalten und die jeweilige Verteilung müssen bekannt sein. Um diese Voraussetzungen zu erfüllen, wird in dieser Arbeit ein spezieller Auswertalgorithmus mit dem Programm qs-STAT ausgeführt: Mittels F-Test wird untersucht, ob der Prozeßmittelwert konstant ist oder nicht. Verändert er sich nicht, wird das am besten geeignete Verteilungsmodell bestimmt. Liegt eine Normalverteilung vor, werden die Eingriffsgrenzen nach Shewhart berechnet. Genügen die Meßdaten keiner Normalverteilung, werden die Eingriffsgrenzen nach Pearson verwendet. Liefert der F-Test keinen konstanten Prozeßmittelwert, werden die erweiterten Shewhart-Eingriffsgrenzen angewendet. Die jeweiligen Definitionen der Eingriffsgrenzen sind in [37] zusammengefaßt.

Im folgenden sind als Beispiel die Gleichungen der Eingriffsgrenzen nach Shewhart für eine normalverteilte Grundgesamtheit dargestellt.

$$OEG = \mu + 3 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad UEG = \mu - 3 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (2.16)$$

Hierbei sind  $\mu$  der Mittelwert und  $\sigma$  die Streuung der Grundgesamtheit und  $n$  die Stichprobenzahl.

### 3 Experimentelles

#### 3.1 Prinzipaufbau der verwendeten LPCVD- und RPCVD-Epitaxieanlagen

Für die epitaktischen LPCVD-Abscheidungen wurde eine kommerzielle Anlage zur Abscheidung von polykristallinem Silizium (4 bis 6 Zoll Wafer) mit einem Low Pressure Rapid Thermal Chemical Vapor Deposition (LP(RT)CVD) Reaktor (AG Associated, Integra One®) verwendet. Die wesentlichen Bestandteile der Anlage sind in Abbildung 3-1 schematisch dargestellt.

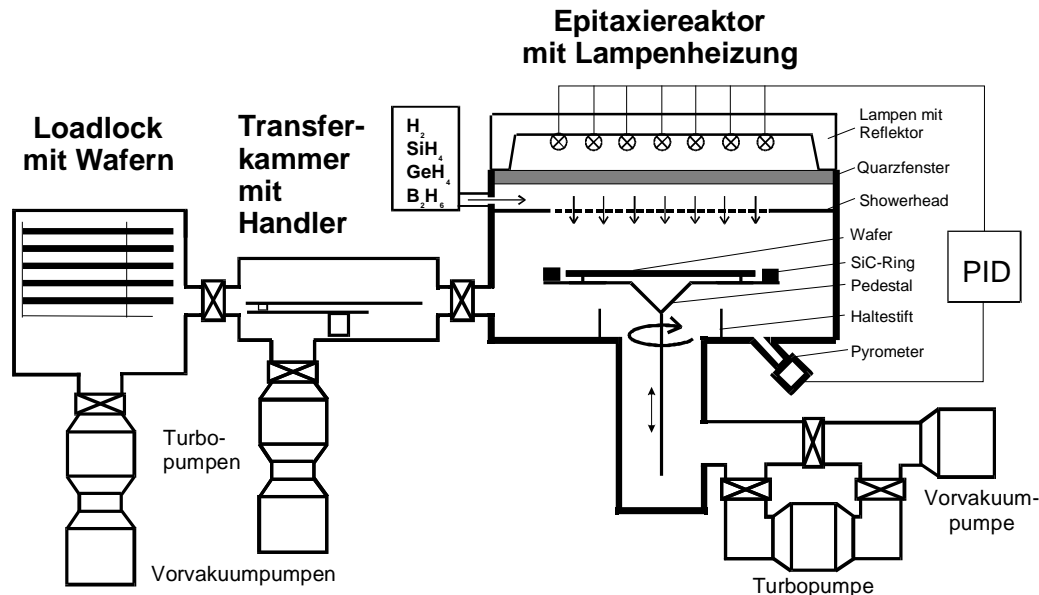


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung der verwendeten LP(RT)CVD-Anlage

Der Kaltwand-Einscheibenreaktor besteht aus wassergekühltem Edelstahl und ist mit Quarz ausgekleidet. Der Wafer wird durch drei Quarzpins des Pedestals gehalten und ist von einem SiC-Ring zur Kompensation der Waferrandabstrahlung umgeben. Um eine homogene Temperaturverteilung und Gasverteilung über dem Wafer zu erreichen, rotiert der Wafer mit einer Geschwindigkeit von 25 Umdrehungen pro Minute.

Die Beheizung des Wafers erfolgt durch ein Quarzfenster mit 7 druckluftgeköhlten Halogenstablampen hoher Leistung (jeweils 6000W). Der Lampenreflektor ist goldbedampft und wassergekühlt. Die Wafertemperatur wird durch ein Infrarotpyrometer gemessen. Dieses Pyrometer steuert in einem PID(Proportional-Integral-Differential)-Regler die Halogenlampen an. Mit diesem LP(RT)CVD-Reaktor kann im Temperaturbereich von 400°C bis 1100°C mit Temperaturaufheizraten von 10°C/s bis 150°C/s gearbeitet werden.

Die Prozeßgase Wasserstoff (H<sub>2</sub>), Silan (SiH<sub>4</sub>), German (GeH<sub>4</sub>), Diboran (B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) und das Reaktorätzgas NF<sub>3</sub> werden durch Mass Flow Controller (MFC) dosiert und in den Reaktor eingespeist.

Für Wasserstoff wurde ein Reiniger (Millipore®-Purifier) eingesetzt, der die Restfeuchte chemisch bindet, um kontinuierlich einen sehr geringen Feuchtigkeitsgehalt kleiner 10 ppb (parts per billion) zu gewährleisten. Mit einer Feuchtemeßzelle (Panametrics®, MIS 1) wurde der Feuchtigkeitsgehalt überwacht.

Der Reaktor wird mit einer Rootspumpe (Edwards®, 240 m<sup>3</sup>/h) und einer Vorvakuumpumpe ohne Schmiermittel (Edwards®, 80 m<sup>3</sup>/h) evakuiert. Mit einer Turbomolekularpumpe (Alcatel®, 240 l/s) wurde der Reaktor bis zu einem Basisdruck kleiner 6 x 10<sup>-6</sup> Pa abgepumpt, um Restgase und Kontaminationen zu entfernen. Für Abscheidungsprozesse konnte der Druck in einem Bereich von 133 Pa bis 20 kPa mit Hilfe eines Drosselventils variiert werden. Der typi-



sche Arbeitsdruck betrug 200 Pa. Dieser Druck wurde mit einem Baratron (MKS<sup>®</sup>, 100Pa-26,6kPa) gemessen. Im Hochvakuumbereich kam eine Kaltkathodenmeßröhre zum Einsatz. Die Anlage ist mit einem Loadlock ausgerüstet, der eine Kassette mit 25 Wafern aufnehmen kann. Mit einem Handler werden die Wafer über eine Transferkammer vom Loadlock zum Epitaxiereaktor bewegt. Sowohl der Loadlock als auch die Transferkammer sind mit Vor- und Turbomolekularpumpen ausgestattet. Damit werden Basisdrücke kleiner  $2 \times 10^{-5}$  Pa im Loadlock und in der Transferkammer erreicht. Im folgenden wird für die Bezeichnung LP(RT)CVD die Abkürzung LPCVD verwendet.

Des weiteren kam eine zweite Epitaxieanlage mit einem Einscheibenreaktor zum Einsatz (ASM, Epsilon 2000<sup>®</sup>). Mit ihr werden Wafer mit einem Durchmesser von 8 Zoll beschichtet. Diese Epitaxieanlage verfügt über zwei Loadlocks und eine Transferkammer. Die Abscheidung erfolgt in diesem Epitaxiereaktor bei einem Druck von 10,6 kPa und wird als Reduced Pressure CVD (RPCVD) bezeichnet. In dieser Anlage kann der Wafer über eine indirekte Lampenheizung durch einen Graphitsuszeptor auf Prozeßtemperaturen von 300°C bis 1150°C aufgeheizt werden. Die Reaktionsgase werden in diesem Reaktor parallel zur Waferoberfläche in Form einer laminaren Strömung mit einer Flußmenge von 20 l/min geführt, wobei Wasserstoff der Hauptbestandteil der Prozeßgase ist. Der Epitaxiereaktor besteht aus Quarz und wird durch eine Hochtemperatur-HCl-Behandlung bei 1150°C gereinigt.

### 3.2 Epitaktische Abscheidung von SiGe-Modellstrukturen und HBT-Schichtstapeln

#### *Typischer Epitaxieprozeßzyklus für LPCVD*

Die Loadlock-, die Transfer- und die Prozeßkammer befinden sich im Standby immer unter Hochvakuum. Vor jedem epitaktischen Prozeß wird mit einer Meßzelle der Feuchtigkeitsgehalt im Wasserstoff bestimmt. Ist dieser größer als 10ppb, wird der Wasserstoff solange über eine Reaktorbypassleitung geführt, bis der Wert unterschritten ist. Anschließend kann der Epitaxieprozeß gestartet werden. Der geringe Feuchtigkeitsgehalt des Wasserstoffs unterdrückt die Oxidbildung während des Wasserstoffprebakes und der epitaktischen Abscheidung.

Ein vollständiger Prozeßzyklus besteht aus der naßchemischen Substratreinigung, dem Wafertransfer zur und innerhalb der Epitaxieanlage und der epitaktischen Abscheidung.

#### *Naßchemische Substratreinigung*

Die Wafer werden mit einer naßchemischen Reinigungsprozedur [1] in einer kommerziellen Reinigungsanlage gereinigt. Im letzten Reinigungsschritt bildet sich ein Passivierungsoxid.

#### *Wafertransfer zur und innerhalb der Epitaxieanlage*

Bis zu 25 ex situ gereinigte Wafer werden in den Loadlock geladen. Im Anschluß wird der Loadlock auf einen Basisdruck von  $2 \times 10^{-5}$  Pa evakuiert. Unter Hochvakuum wird der Wafer in den Reaktor transferiert. In der Prozeßkammer wird der Wafer auf Haltestifte abgelegt, und das Pedestal bewegt sich auf die Prozeßposition. Im Anschluß startet die Waferrotation und der Epitaxieprozeß.

#### *Epitaxieprozeß*

Der Epitaxieprozeß besteht aus zwei Teilen. Zunächst erfolgt ein Wasserstoffprebake bei 1000°C zur Entfernung von Sauerstoff- und Kohlenstoffkontaminationen von der Waferoberfläche. Anschließend beginnt nach der Einregelung der Prozeßtemperaturen und der Zuführung der Prozeßgase der Abscheideprozeß.

#### *Wafertransfer*

Nach Beendigung des Epitaxieprozesses erfolgt der Wafertransfer vom Reaktor zum Loadlock unter Hochvakuum.

#### *Reaktorreinigung*

Nach 25 bearbeiteten Wafern erfolgt eine in situ Reinigung des Reaktors mit thermisch (1000°C) aktiviertem NF<sub>3</sub>-Ätzgas, indem SiGe- und Si-Beläge von den Quarzeinbauten des Reaktors entfernt werden.

### Typischer Epitaxieprozeßzyklus für RPCVD

Der typische Epitaxiezyklus der RPCVD-Anlage umfaßt die gleichen Prozeßschritte wie der LPCVD-Reaktor mit folgenden Unterschieden:

- Die Wafer werden vom Loadlock unter  $H_2$ -Atmosphäre bei Normaldruck in den Epitaxie-reaktor transferiert.
- Die Reaktorreinigung erfolgt vor jedem Abscheidungsprozeß durch eine HCl-Ätzung bei  $1150^\circ C$ .

### SiGe-Modellstrukturen

SiGe-Modellstrukturen wurden mit dem Ziel präpariert, die Epitaxie anhand epitaktischer Schichtparameter unter Ausschluß des Einflusses weiterer technologischer Schritte zu bewerten. Die SiGe-Modellstrukturen besitzen einen einfachen Schichtaufbau: Im Gegensatz zu epitaktischen SiGe/Si-HBT-Profilen sind der Bor- und Germaniumgehalt der betrachteten Modellstrukturen konstant. Von diesen Modellstrukturen können nach der epitaktischen Abscheidung folgende Schichtparameter gemessen werden:

- SiGe-Schichtdicke  $d_{SiGe}$ ,
- Germaniumgehalt  $x$  und
- Schichtwiderstand  $R_s$ .

Der Germaniumgehalt und die SiGe-Schichtdicke wurde mit Röntgenbeugung (siehe Abschnitt 3.4) an einem Meßpunkt in der Scheibenmitte bestimmt. Der Schichtwiderstand wurde durch  $R_s$ -Mappings an einem  $R_s$ -Vierspitzen-Meßplatz ermittelt. Bei diesen SiGe-Modellstrukturen wurden keine Misfitversetzungen nachgewiesen, die auf Relaxationen der SiGe-Schicht hinweisen würden.

In Abbildung 3-2 sind das B- und das Ge-Profil für die LPCVD-Prozeßbedingungen dargestellt.

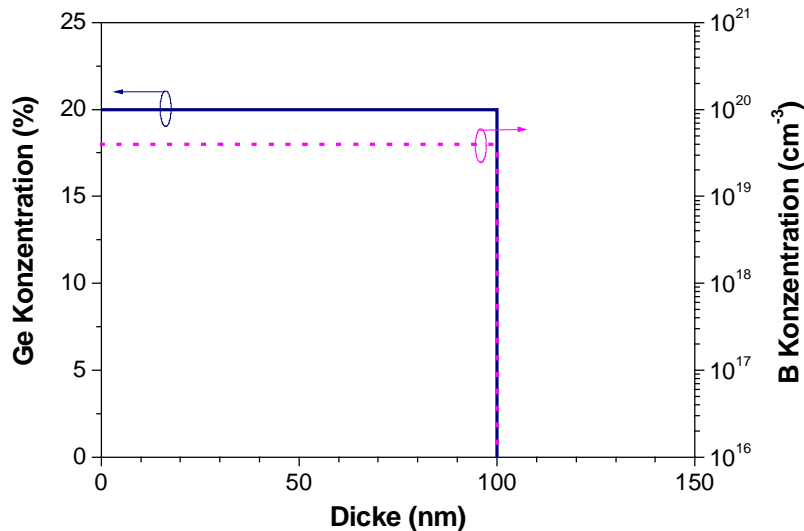


Abbildung 3-2: Ge- und B-Profil einer Modellstruktur zur Bewertung der SiGe-Epitaxie mit LPCVD-Bedingungen

Ferner sind in Tabelle 3-1 die Zielwerte von Modellstrukturen des LPCVD- und des RPCVD-Verfahrens zusammengefaßt. Die Borkonzentrationen entsprechen den Peakkonzentrationen von in dieser Arbeit untersuchten HBTs, und die Germaniumkonzentrationen sind mit den Maximalwerten der Ge-Profile dieser HBTs identisch.

Tabelle 3-1: Zielwerte der SiGe-Modellstrukturen des LPCVD- und des RPCVD-Epitaxieverfahrens

| Parameter                 | LPCVD              | RPCVD              |
|---------------------------|--------------------|--------------------|
| $d_{SiGe}$ (nm)           | 100                | 100                |
| $x$ (%)                   | 20                 | 20                 |
| $c_B$ (cm <sup>-3</sup> ) | $6 \times 10^{19}$ | $1 \times 10^{20}$ |
| $R_s$ ( $\Omega$ )        | 220                | 130                |

Zur Abscheidung der SiGe-Modellstrukturen wurden unstrukturierte, n-dotierte (100)-Siliziumsubstrate mit einem spezifischen Schichtwiderstand von 10 bis 20  $\Omega\text{cm}$  verwendet, die nach einer Standardprozedur naßchemisch gereinigt wurden [1].

Auf der einkristallinen Siliziumoberfläche wird unter Verwendung von  $\text{H}_2$ ,  $\text{SiH}_4$ ,  $\text{GeH}_4$  und  $\text{B}_2\text{H}_6$  die bordotierte SiGe-Schicht abgeschieden. Im Fall des LPCVD-Verfahrens erfolgt die SiGe-Abscheidung bei einem Druck von 200Pa, einer Temperatur von 500°C und einem Wasserstofffluß von 1,8 l/min, während beim RPCVD-Verfahren der Druck 10,6kPa, die Temperatur 600°C und der Wasserstofffluß 20l/min betragen.

### HBT-Profile

Im folgenden wird exemplarisch ein HBT-Profil beschrieben, das in Abbildung 3-3 dargestellt ist.

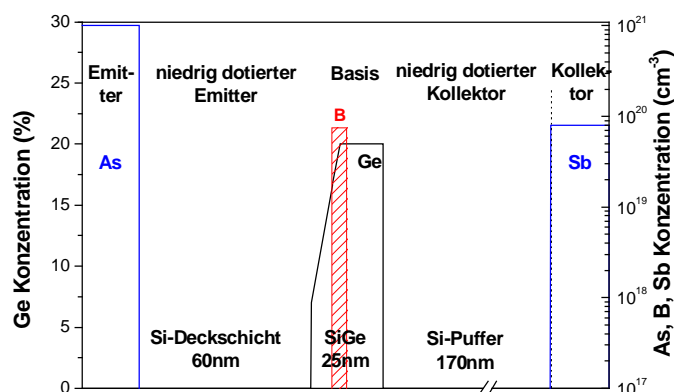


Abbildung 3-3: HBT1-Profil mit einem As-Emitter, einem niedrig dotierten Emitter-, einem SiGe-Basis- und einem niedrig dotierten Kollektorgebiet sowie einem Sb-Kollektor

Der hochdotierte Emitter besteht aus Arsen-implantiertem, polykristallinem Silizium. Der hochdotierte Kollektor wurde mittels Antimon-Implantation hergestellt. Der niedrig dotierte Emitter, die Bor-dotierte SiGe-Basis und der niedrig dotierte Kollektor wurden epitaktisch abgeschieden.

Dieser Si/SiGe/Si-Stapel stellt hohe Anforderungen an die Epitaxie: Das Ge-Basis-Profil mit Plateau und Gradient besitzt nur eine geringe vertikale Ausdehnung und steile Konzentrationsgradienten. In dieses Ge-Profil muß Bor mit einer hohen Peakkonzentration und sehr steilen Konzentrationsgradienten eingebaut werden.

Tabelle 3-2 enthält eine Übersicht der untersuchten HBT-Profile. Hierbei bezeichnet  $d_{\text{Si-Puffer}}$  die Dicke der Siliziumpufferschicht,  $d_{\text{SiGe}}$  die gesamte SiGe-Schichtdicke und  $d_{\text{Si-Cap}}$  die Siliziumdeckschichtdicke. Diese Parameter sind am Beispiel des HBT1-Profils in Abbildung 3-3 dargestellt.

Tabelle 3-2: Untersuchte HBT-Profile mit epitaktischen Profilparametern

| HBT-Profil | $d_{\text{Si-Cap}}$<br>(nm) | $d_{\text{SiGe}}$<br>(nm) | Basisdotierungsdosis<br>( $\text{cm}^{-2}$ ) | $d_{\text{Si-Puffer}}$<br>(nm) | Epitaxie-<br>verfahren |
|------------|-----------------------------|---------------------------|--|--------------------------------|------------------------|
| HBT1       | 60                          | 25                        | B: $4,0 \times 10^{13}$                      | 170                            | LPCVD                  |
| HBT2a      | 60                          | 27                        | B: $4,0 \times 10^{13}$                      | 50                             | LPCVD                  |
| HBT2b      | 45                          | 27                        | B: $4,0 \times 10^{13}$                      | 50                             | RPCVD                  |
| HBT3       | 50                          | 25                        | B: $1,4 \times 10^{14}$<br>C: 0,2 %          | 30                             | RPCVD                  |

Die drei HBT-Profile unterscheiden sich in der Siliziumdeckschichtdicke, in der Siliziumpufferschichtdicke, in der SiGe-Schichtdicke und in der Basisdotierung. Die Gemeinsamkeit der HBT-Profile besteht im Aufbau der Ge-Profile, die jeweils aus einem Teil mit konstantem Germaniumgehalt von 20% (Plateau) und einem Teil mit variablem Germaniumgehalt (Gra-

dient) bestehen. Ferner ist allen drei Profilen die Lage des Bor-Konzentrationsprofils innerhalb des Ge-Profiles gemeinsam.

Mit dem HBT1-Profil wird das LPCVD-Epitaxieverfahren bewertet. Das HBT2-Profil dient dem unmittelbaren Vergleich zwischen LPCVD- und RPCVD-Epitaxieverfahren. Schließlich wird das RPCVD-Verfahren mit dem HBT3-Profil bewertet. Durch dessen höhere Bordotierung läßt sich bei gleichen lateralen Transistorabmessungen ein deutlich niedriger Basiswiderstand erreichen. Allerdings erhöht sich damit die Gefahr einer Ausdiffusion des Bors aus der SiGe-Schicht, die zu einer Degradation der Stromverstärkung und der Transitfrequenz führen würde [2]. Durch eine zusätzliche Dotierung der SiGe-Schicht mit Kohlenstoff kann dieser negative Effekt wirksam unterdrückt werden [2].

Der Zusammenhang zwischen Prozeß- und Schichtparametern ist für das HBT1-Profil in Abbildung 3-4 dargestellt. Als wesentliche Prozeßparameter wurden die Temperatur, sowie die  $\text{GeH}_4$ (10% in  $\text{H}_2$ )- und  $\text{B}_2\text{H}_6$ (50ppm in  $\text{H}_2$ )-Gasflüsse ausgewählt.

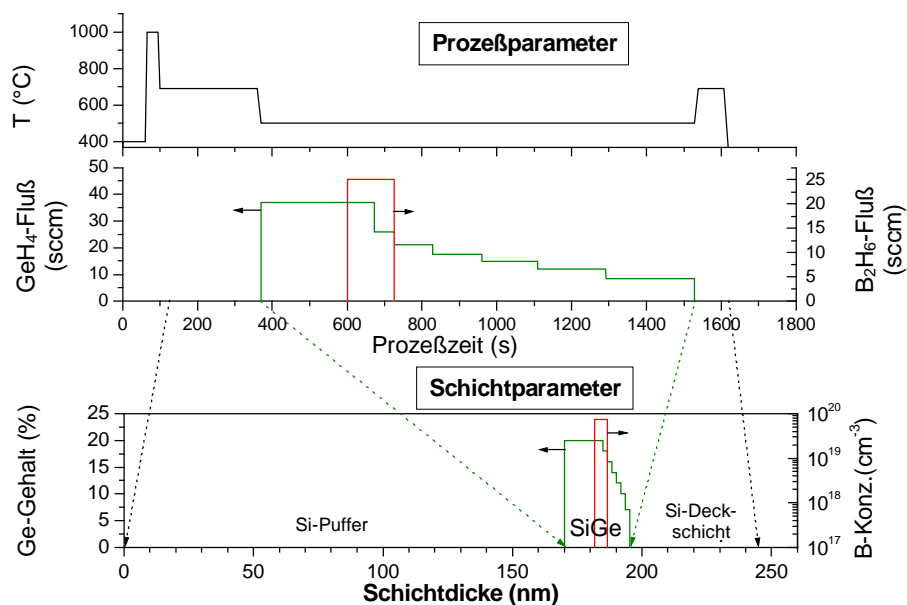


Abbildung 3-4: Prozessparameter (Temperatur,  $\text{GeH}_4$ - und  $\text{B}_2\text{H}_6$ -Gasfluß) in Abhängigkeit von der Prozesszeit zur Abscheidung eines Si/SiGe/Si-Profils sowie dessen Schichtparameter in Abhängigkeit von der Schichtdicke

Weitere Prozessparameter zur Realisierung des HBT1-Profils sind in Tabelle 3-3 zusammengefaßt.

Tabelle 3-3: Prozessparameter der epitaktischen Abscheidung des HBT1-Profils

|                           | T<br>(°C) | t<br>(s) | p<br>(Pa) | H <sub>2</sub><br>(slm) | SiH <sub>4</sub><br>(sccm) |
|---------------------------|-----------|----------|-----------|-------------------------|----------------------------|
| <b>Wasserstoffprebake</b> | 1000      | 30       | 1300      | 1,8                     |                            |
| <b>Si-Puffer</b>          | 690       | 220      | 200       | 1,8                     | 70                         |
| <b>SiGe-Basis</b>         | 500       | 1170     | 200       | 1,8                     | 70                         |
| <b>Si-Cap</b>             | 690       | 70       | 200       | 1,8                     | 70                         |

Im unteren Teil von Abbildung 3-4 ist das resultierende Si/SiGe/Si-Profil dargestellt. Beim Vergleich zwischen Prozeß- und Schichtparametern wird deutlich, daß die Abscheidung der SiGe-Basis mit 70% den größten Teil der gesamten Prozesszeit ausmacht.

Nach den Prozesszeiten in Tabelle 3-3 ergibt sich ein Waferdurchsatz von 2,4 Wafern pro Stunde. Dieser Durchsatz kann im Fall der LPCVD-Anlage durch den Einsatz von 3 Prozeß-

kammern im Parallelbetrieb auf 7,2 Wafer pro Stunde erhöht werden. Dieser Durchsatz ist dem der IBM-UHVCVD-Anlage ähnlich [3]. Im Fall des RPCVD-HBTs beträgt der Durchsatz 2 Wafer pro Stunde.

#### 3.3 Aufbau der untersuchten HBTs

Entsprechend der drei in Abschnitt 3.2 vorgestellten HBT1-, HBT2- und HBT3-Profile werden im folgenden die entsprechenden Transistoren als HBT1, HBT2 und HBT3 bezeichnet. Konstruktiv unterscheiden sich diese drei Transistoren folgendermaßen:

HBT1 ist ein Doppelmesastransistor (Abbildung 3-5). Die Emitterfläche dieses Transistors beträgt  $(100 \times 100) \mu\text{m}^2$  und die Basisfläche  $(100 \times 200) \mu\text{m}^2$ . Die Emitter- und insbesondere die Basisfläche wurden deshalb so groß dimensioniert, um eine Messung nach der Silizierung durch Direktantastung zu ermöglichen.

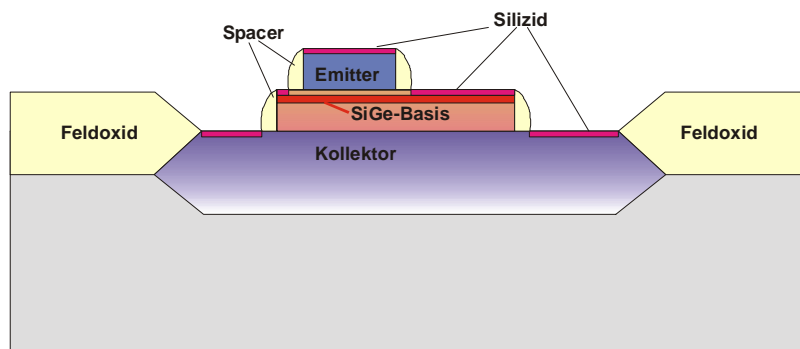


Abbildung 3-5: Prinzipskizze des Doppelmesa-HBT1

Beim HBT2 wird der polykristallin gewachsene Si/SiGe/Si-Schichtstapel auf Feldoxid als Basisanschlußgebiet verwendet (Abbildung 3-6). Dieser Transistor besitzt einen Multiemitter der Fläche  $24 \times (1 \times 1) \mu\text{m}^2$ .

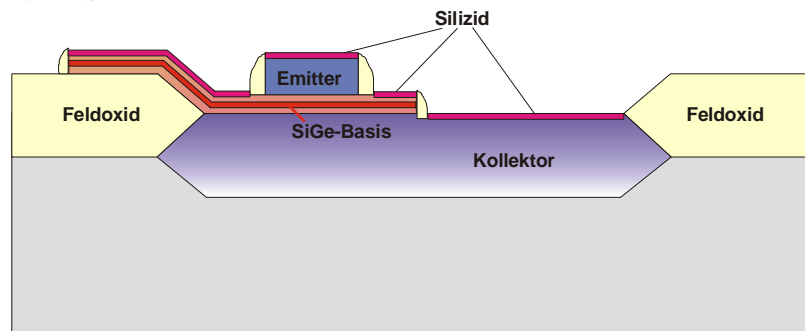


Abbildung 3-6: Prinzipskizze des HBT2

HBT3 ähnelt im Aufbau HBT2, nur daß Trenchisolation anstelle von lokaler Feldoxidation verwendet wurde. Die Emitterfläche dieses Transistors betrug  $(100 \times 100) \mu\text{m}^2$ . Darüber hinaus wurden zur Ausbeutebewertung Arrays von 4096 parallel-geschalteten Transistoren mit HBT3-Profil und einer individuellen Emitterfläche von  $0,5 \mu\text{m}^2$  untersucht.

### 3.4 Charakterisierung von HBTs, Teststrukturen und Epitaxieschichten

Für alle drei HBT-Profile wurden an Teststrukturen mittels Röntgenbeugung die Epitaxieschichtparameter  $d_{\text{Si-Cap}}$ ,  $d_{\text{SiGe}}$  und  $x$  bestimmt. Ferner wurde für jeden Wafer die Schichtqualität an 5 Chips mit Hilfe optischer Dunkelfeldmikroskopie bewertet.

Aus elektrischen Messungen wurden folgende Parameter gewonnen:

- Emitter-Basis-Raumladungsweite zur Bewertung der Homogenität und Reproduzierbarkeit der Siliziumdeckschichtdicke,
- Innerer Basisschichtwiderstand zur Bewertung der Homogenität und Reproduzierbarkeit des B-Profils der HBT-Basis,
- Kollektorstrom zur Bewertung der reproduzierbaren Einstellung des Ge- und des B-Profils und
- Leckstrom begrenzte Ausbeute zur Bewertung der Epitaxieschichtqualität von HBT-Schichtstapeln.

In Tabelle 3-4 sind für den HBT1 die Epitaxieschicht- und die HBT-Parameter mit der Anzahl der Stichproben aufgeführt. Als Datenbasis für die statistischen Untersuchungen dienten 27 Lose. Von diesen Losen wurden an insgesamt 93 Wafern mit jeweils einem Meßpunkt im Zentrum die Epitaxieschichtparameter mit Röntgenbeugung bestimmt. Im Fall der Emitter-Basis-Raumladungsweiten und des Kollektorstroms wurden 37 Chips pro Wafer und für den inneren Basisschichtwiderstand und den Kollektor-Emitter-Sperrstrom 124 Meßwerte pro Wafer statistisch bewertet.

Tabelle 3-4: Statistisch bewertete Epitaxie- und Transistorparameter des HBT1  
(k-Stichprobenanzahl; n-Stichprobenumfang)

| Art                              | Parameter                       | Abkürzung           | Meßverfahren            | Datenbasis |     |       |
|----------------------------------|---------------------------------|---------------------|-------------------------|------------|-----|-------|
|                                  |                                 |                     |                         | k          | n   | n•k   |
| <b>Epitaxieschicht-Parameter</b> | Silizium-Deckschichtdicke       | $d_{\text{Si-Cap}}$ | XRD                     | 93         | 1   | 93    |
|                                  | SiGe-Basis-Schichtdicke         | $d_{\text{SiGe}}$   | XRD                     | 93         | 1   | 93    |
|                                  | Ge-Konzentration im Plateau     | $x$                 | XRD                     | 93         | 1   | 93    |
|                                  | Defektdichte                    | $D$                 | Dunkelfeldmessung       | 782        | 5   | 3910  |
| <b>HBT-Parameter</b>             | Emitter-Basis-Raumladungsweite  | $X_{\text{EB}}$     | Kapazitätsmessung       | 501        | 37  | 18537 |
|                                  | innerer Basis-Schichtwiderstand | $R_{\text{SBI}}$    | $R_{\text{S}}$ -Messung | 514        | 124 | 63736 |
|                                  | Kollektor-Strom                 | $I_{\text{C}}$      | Transistormessung       | 509        | 37  | 18833 |
|                                  | Kollektor-Emitter-Sperrstrom    | $I_{\text{CEO}}$    | Transistormessung       | 404        | 124 | 50096 |

Im Fall des HBT2 wurden  $X_{\text{EB}}$ ,  $R_{\text{SBI}}$  und  $I_{\text{C}}$  für 19 Wafer ausgewertet. Vom HBT3 wurden  $X_{\text{EB}}$ ,  $R_{\text{SBI}}$  und  $I_{\text{C}}$  an 24 Wafern mit jeweils 45 Chips gemessen und bewertet.

#### 3.4.1 Charakterisierung von HBTs und elektrischen Teststrukturen

Im folgenden werden die Kapazitäts-, die  $R_{\text{SBI}}$ -Messungen und die Messungen der Kollektor-Emitter- und der Emitter-Kollektor-Leckströme erläutert.

##### **Kapazitätsmessung zur Bestimmung der Raumladungsweiten $X_{\text{EB}}$**

Die Raumladungsweite  $X_{\text{EB}}$  wird durch Kapazitätsmessung an der Emitter-Basis-Diode des HBTs unter Verwendung folgender Gleichung bestimmt:

$$X_{\text{EB}} = \varepsilon_{\text{Si}} \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{A_{\text{E}}}{C_{\text{EB}}} \quad (3.1)$$

Dabei ist  $\varepsilon_{\text{Si}}$  die Dielektrizitätskonstante von Silizium (11,7),  $\varepsilon_0$  die Dielektrizitätskonstante im Vakuum,  $A_{\text{E}}$  die Emitterfläche ( $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ ) und  $C_{\text{EB}}$  die gemessene Emitter-Basis-Kapazität.

Der Meßfehler der Raumladungsweite wird bestimmt durch:

1. die Ungenauigkeit der Kapazitätsmessung und
2. den Fehler der Emitterflächen, der sich durch die technologische Strukturierung ergibt.

Der Meßfehler der Kapazitätsmessung an den untersuchten Meßstrukturen mit Kapazitäten im 10pF-Bereich beträgt 3%. Zur Bestimmung des Strukturierungsfehlers kann von einem maximalen Übertragungsfehler von 0,8µm ausgegangen werden. Daraus folgt für 100x100µm<sup>2</sup>-Strukturen ein maximaler Fehler von 1,6% ( $2 \times (0,8 \times 100) \mu\text{m}^2 / 10^4 \mu\text{m}^2$ ). Insgesamt ergibt sich daraus eine Meßungenauigkeit der Raumladungsweiten von 5 %.

#### Messung des inneren Basisschichtwiderstandes $R_{S_{Bi}}$

Die  $R_{S_{Bi}}$ -Struktur besteht aus einem Basisgebiet mit zwei Kontaktbereichen, zwischen denen sich die aktive Basis mit dem darüber aufgetragenen Emitter befindet (Abbildung 3-7a). Zwischen den beiden Basisgebieten werden in einem Spannungsbereich von -0,4V bis +0,4V die zugehörigen Ströme gemessen. Daraus wird der Widerstand R errechnet. R besteht aus folgenden Komponenten:

$$R = R_K + R_{\text{Silizid}} + R_{BL} + R_{S_{Bi}} \cdot \frac{L}{B} \quad (3.2)$$

Dabei bezeichnet  $R_K$  den Kontaktwiderstand der Meßspitzen,  $R_{\text{Silizid}}$  den Silizidwiderstand,  $R_{BL}$  den Basislinkwiderstand,  $R_{S_{Bi}}$  den inneren Basisschichtwiderstand, L die Länge (150µm) und B die Breite (100µm) des inneren Basisgebietes.

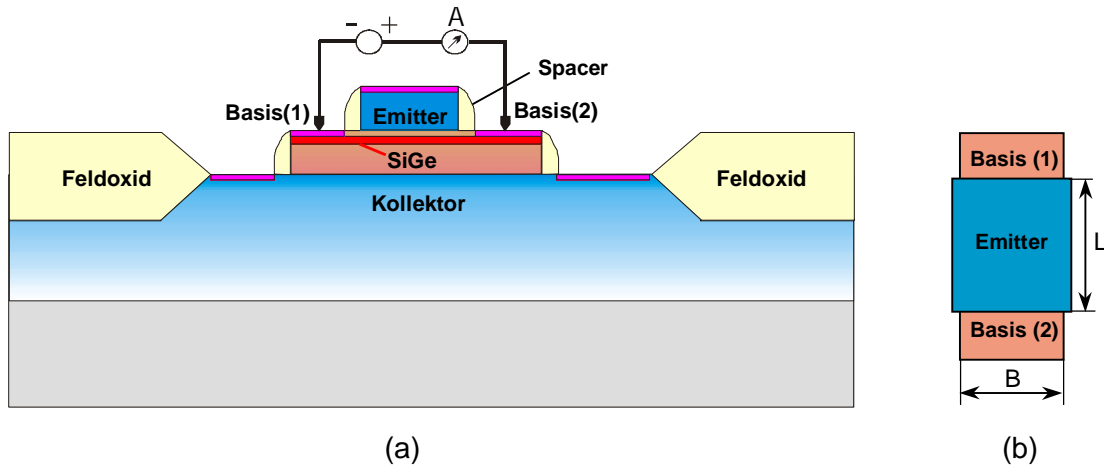


Abbildung 3-7: Prinzipskizze der  $R_{S_{Bi}}$ -Meßstruktur (a) und Draufsicht auf die Basis- und Emittergebiete (b)

$R_K$  ist bei Metallkontakten kleiner 1 Ohm.  $R_{\text{Silizid}}$  liegt in der Größenordnung von einigen Ohm und kann vernachlässigt werden. Der Basislinkwiderstand  $R_{BL}$  ist der Widerstand der Basischicht unter den Emitterspacern (Abbildung 3-7a).  $R_{BL}$  wird durch das Borprofil im Si/SiGe/Si-Schichtstapel eingestellt. Der Flächenanteil von  $(0,25 \times 100) \mu\text{m}^2$  unter dem Emitterspacer ist im Vergleich zur inneren Basisfläche von  $(100 \times 150) \mu\text{m}^2$  so gering, daß  $R_{BL}$  im Vergleich zu  $R_{S_{Bi}}$  ebenfalls vernachlässigbar klein ist. Demnach sind in Gleichung (3.2) alle anderen Widerstandskomponenten gegenüber dem  $R_{S_{Bi}}$ -Anteil vernachlässigbar klein. Ihr Beitrag zum Gesamtwiderstand R wird mit weniger als 5% abgeschätzt.

### **Messung der Kollektor-Emitter- und Emitter-Kollektor-Leckströme**

Der Meßaufbau zur Bestimmung der Kollektor-Emitter- und Emitter-Kollektor-Restströme  $I_{CEO}$  und  $I_{ECO}$  ist in Abbildung 3-8 skizziert.

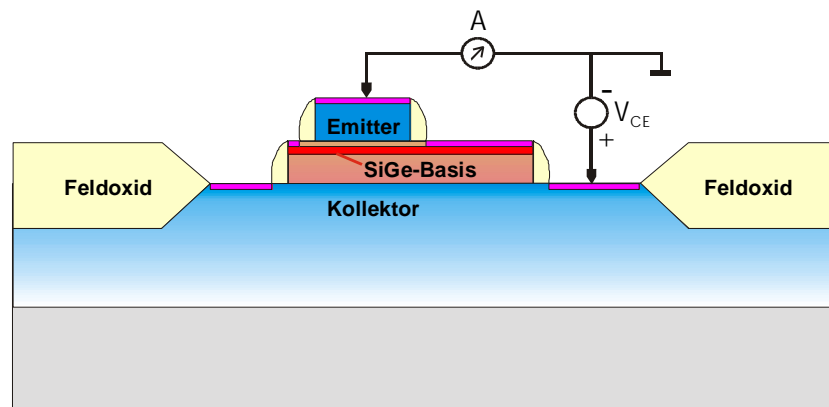


Abbildung 3-8: Prinzipskizze zur  $I_{CEO}$ -Messung ( $I_{ECO}$ -Messung:  $V_{CE}$  mit anderer Polarität)

$I_{CEO}$  wurde bei einer Kollektor-Emitter-Spannung  $V_{CE}$  von 2V bei nichtkontaktierter Basis ermittelt. Bei dieser Messung wird die Kollektor-Basis-Diode in Sperrichtung und die Basis-Emitter-Diode in Durchlaßrichtung betrieben.

Der Emitter-Kollektor-Reststrom  $I_{ECO}$  wurde bei einer Kollektor-Emitter-Spannung  $V_{CE}$  von 0,4V bei nichtkontaktierter Basis bestimmt. In diesem Fall wird die Basis-Emitter-Diode gesperrt und die Basis-Kollektor-Diode in Durchlaßrichtung betrieben.

### **3.4.2 Charakterisierung von Epitaxieschichten**

#### **Optische Mikroskopie**

Ein optisches Mikroskop (Leika) mit einer maximalen Vergrößerung von 1000 wurde eingesetzt, um Oberflächendefekte der Epitaxieschichten zu bestimmen. Das Mikroskop wurde im Dunkelfeldmodus betrieben, weil damit geringste Oberflächenrauigkeiten sichtbar gemacht werden.

#### **TEM**

Die Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) wird allgemein zur Mikrostrukturanalyse von Festkörpern eingesetzt. In dieser Arbeit wurden mit diesem Diagnostikverfahren Kristallstruktur und Kristalldefekte untersucht. Dieses Verfahren ist ausführlich in [4] beschrieben.

#### **SIMS (Sekundärionen Massenspektroskopie)**

Mittels Sekundärionen Massenspektroskopie (SIMS) wurden Konzentrationsprofile von Dotierelementen wie Bor, Arsen, Antimon und von Kontaminationen wie Sauerstoff in SiGe/Si-Schichtstapeln bestimmt. Eine ausführliche Beschreibung des SIMS-Verfahrens befindet sich in [5].

#### **XRD**

Die Schichtdicke und die Germaniumkonzentration der epitaktischen Si- und SiGe-Schichten wurden mit dem Röntgenbeugungsverfahren (X-Ray Diffraction - XRD) bestimmt.

#### **Dickenmessung der SiGe-Schicht**

Abbildung 3-9 stellt die gemessene und die simulierte [004]-Rockingkurve einer 100 nm dicken SiGe-Schicht ( $x=0,2$ ) auf Si-Substrat in symmetrischer Reflexionsgeometrie dar.



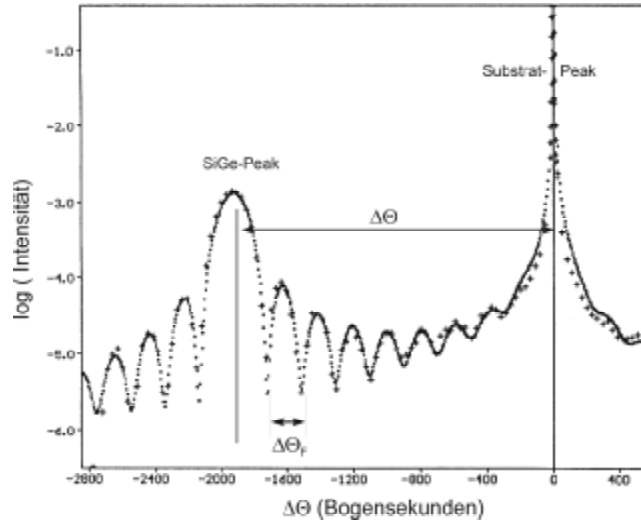


Abbildung 3-9: Gemessene (+) und simulierte (•) [004] Rockingkurve einer SiGe-Schicht mit  $d=100\text{nm}$  und  $x=20\%$  auf Si-Substrat

Die unterschiedlichen Gitterkonstanten des Substrats und der Epitaxieschicht verursachen einen Substrat- und einen SiGe-Peak. Gemäß der dynamischen Beugungstheorie entstehen an dünnen Schichten durch Interferenz die sogenannten Pendellosungszillationen [6], woraus die SiGe-Schichtdicke durch den Ausdruck

$$d = \frac{\lambda}{2\Delta\Theta_F \cos \Theta_B} \quad (3.3)$$

bestimmt werden kann.

Hierbei sind  $\lambda$  die Wellenlänge der Röntgenstrahlen ( $\text{Cu}_{K\alpha}=0,154\text{nm}$ ),  $\Theta_B$  der kinematische Braggwinkel, der  $34,56^\circ$  für [004]-Reflektion beträgt und  $\Delta\Theta_F$  die Periode der Interferenzoszillationen. Die Meßgenauigkeit hängt von der Schichtqualität und den Meßbedingungen (Intensität der einfallenden Strahlung, Meßzeit, Schrittweite) ab.

#### Gitterverspannung und Zusammensetzung der SiGe-Schicht

Die senkrechte Gitterkonstante der SiGe-Schicht  $a_\perp$  kann durch folgende Beziehung

$$\Delta\Theta_{[004]} = 2 \arcsin\left(\frac{2\lambda}{a_{Si}}\right) - 2 \arcsin\left(\frac{2\lambda}{a_\perp}\right) \quad (3.4),$$

aus der Rockingkurve (Abbildung 3-9) bestimmt werden, wobei  $\Delta\Theta_{[004]}$  die Winkeldifferenz zwischen dem Substrat- und dem SiGe-Peak ist. Mit den Gleichungen 2.2 und 2.3 kann daraus der Germaniumgehalt bestimmt werden.

#### Messung und Bestimmung von Ge-Profilen

Die Charakterisierung des Si/SiGe-Profiles erfolgt ebenfalls durch Röntgenbeugung. In Abbildung 3-10 a sind eine experimentelle und eine simulierte Rockingkurve dargestellt. Die simulierte Kurve beschreibt die experimentelle sehr gut. Aus der simulierten Kurve ergibt sich das zugehörige Ge-Profil (Abbildung 3-10 b).

Folgende Merkmale von Rockingkurven stehen nach [7] in direktem Zusammenhang mit Si/SiGe-Profilparametern:

- Die Oszillationen der Rockingkurven werden hauptsächlich von der Si-Deckschicht verursacht.
- Das Intensitätsmaximum bei  $\Delta\Theta = -1700$  Bogensekunden korreliert mit einem durchschnittlichen Germaniumgehalt.
- Die Breite des SiGe-Peaks hängt von der SiGe-Schichtdicke und dem Gradienten der Germaniumkonzentration ab.

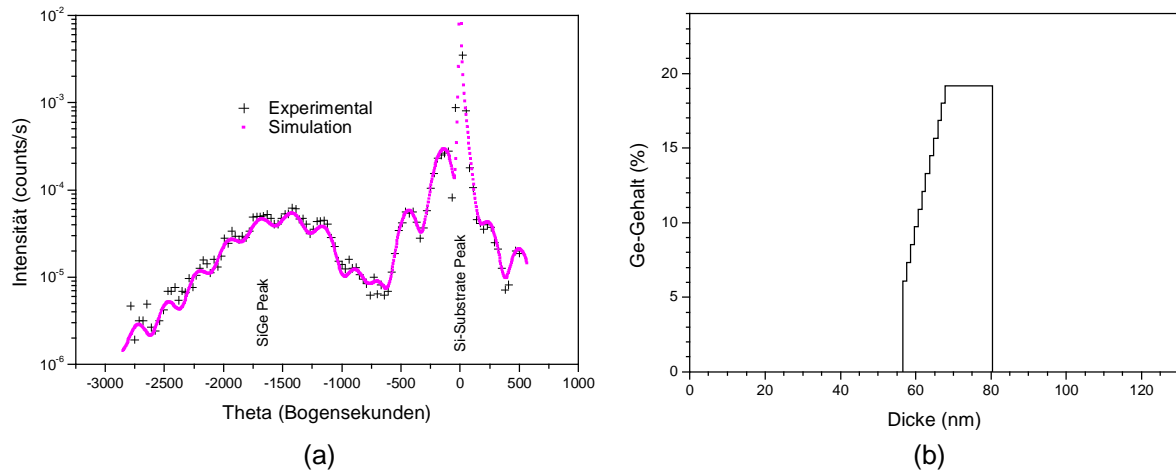


Abbildung 3-10: Experimentelle und simulierte Rockingkurve (a) und zugehöriges Ge-Profil (b)  
( $d_{\text{SiGe}}=23\text{nm}$ ,  $d_{\text{Si}}=57\text{nm}$ )

Um zu genauen und reproduzierbaren Si/SiGe-Profil-Parametern zu gelangen, ist eine exakte Simulation erforderlich. Dazu wird nach [7] das Si/SiGe-Profil in dreizehn Lamellen aufgeteilt. Die erste Lamelle beschreibt die Si-Deckschicht, die nicht verspannt ist. Der SiGe-Gradient wird durch die folgenden 11 Lamellen und das SiGe-Plateau durch die 12. Lamelle dargestellt. Unter Verwendung eines Algorithmus auf der Grundlage des Modells von Kyutt [8] wird eine Simulationskurve mit 16 freien Parametern an die experimentelle Rockingkurve angefitet. Eine detaillierte Beschreibung des Auswerteverfahrens befindet sich in [7]. Dort wird auch die Genauigkeit dieses Verfahrens untersucht. Durch Vergleich mit TEM-Untersuchungen wurde ein Fehler des Röntgenverfahrens bei der Si-Deckschicht- und der SiGe-Gesamtschichtdickenbestimmung kleiner  $\pm 0,5\text{nm}$  ermittelt. Für das betrachtete Si/SiGe-Profil wurde eine Genauigkeit besser  $\pm 0,5\%$  für  $x_{\text{max}}$  und  $\pm 2\text{ nm}$  für  $d_{\text{SiGe}}$  abgeschätzt [7].

### Vierspitzenmessung des Schichtwiderstandes

Der Widerstand  $R$  einer Halbleiterschicht der Schichtdicke  $d$ , der Breite  $b$  und der Länge  $l$  wird durch folgende Gleichung beschrieben:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{b \cdot d} \quad , \quad (3.5)$$

wobei  $\rho$  der spezifische Schichtwiderstand ist. Unter der Annahme  $l=b$  ergibt sich daraus der Schichtwiderstand  $R_s$ :

$$R_s = \frac{\rho}{d} \quad [\Omega/\square] \quad (3.6).$$

Die Vierspitzenmessung ist in [9] detailliert erläutert. Nachfolgend wird für den Schichtwiderstand  $R_s$  die Einheit  $\Omega$  verwendet.

## 4 Kinetik der epitaktischen Abscheidung von Silizium- und SiGe-Schichten

In diesem Abschnitt wird die Kinetik der Silizium- und der SiGe-Epitaxie für LPCVD- (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) und RPCVD- (Reduced Pressure Chemical Vapor Deposition) Prozeßbedingungen dargestellt.

Die Siliziumepitaxie wird durch die Abscheiderate und deren Abhängigkeit von Temperatur und Silanpartialdruck beschrieben. Im Fall der SiGe-Epitaxie werden die Abscheiderate, die Germaniumkonzentration von SiGe-Schichten und die Borkonzentration von dotierten SiGe-Schichten in Abhängigkeit von den Prozeßparametern (z.B. Temperatur und Gaspartialdrücke) untersucht.

### 4.1 Siliziumabscheidung

In Abbildung 4-1 ist die Abscheiderate von Siliziumschichten unter LPCVD- und RPCVD-Prozeßbedingungen als Funktion der Temperatur dargestellt. Die Meßpunkte können gut mit der Arrheniusgleichung (2.6) beschrieben werden (durchgezogene Linie). Der Anstieg ist für beide Prozeßbedingungen gleich und liefert eine Aktivierungsenergie von etwa 1,9 eV.

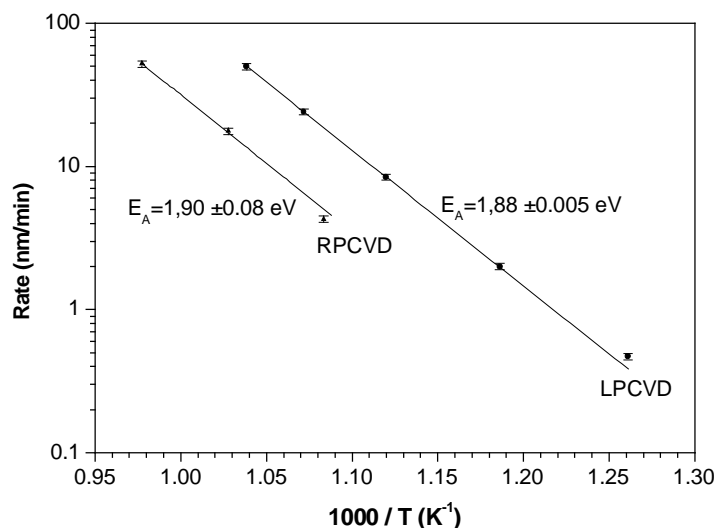


Abbildung 4-1: Abhängigkeit der Si-Abscheideraten von der Temperatur für LPCVD-Bedingungen mit  $p_{\text{H}_2}=192 \text{ Pa}$ ;  $p_{\text{SiH}_4}=7,5 \text{ Pa}$  und RPCVD-Bedingungen mit  $p_{\text{H}_2}=10,6 \text{ kPa}$ ;  $p_{\text{SiH}_4}=26,5 \text{ Pa}$

Sie stimmt gut mit den Werten von Greve (2 eV [1]), von Garone et al. (1,9 eV [2]) und von Liehr et al. (2eV [3]) überein. Diese Aktivierungsenergie entspricht jener der thermischen Wasserstoffdesorption auf (100)-Siliziumoberflächen [4], d.h. die Wasserstoffdesorption begrenzt die Siliziumabscheiderate.

Die Siliziumabscheideraten sind bei gleicher Temperatur für RPCVD geringer als bei LPCVD. Da der Silanpartialdruck bei RPCVD (26,5 Pa) größer als bei LPCVD (7,5 Pa) ist, kann nur der höhere Wasserstoffpartialdruck (10,6 kPa gegenüber 192 Pa bei LPCVD) dieses Verhalten verursachen.

Abbildung 4-2 zeigt die Abhängigkeit der Siliziumabscheiderate vom Silanpartialdruck für LPCVD.

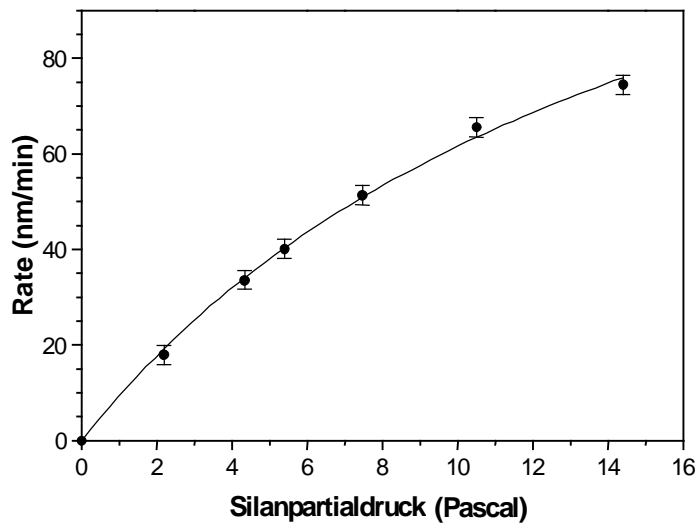


Abbildung 4-2: Abhängigkeit der Si-Abscheiderate vom Silanpartialdruck bei 690°C für  $p_{H_2}=192$  Pa und  $p_{ges}=200$  Pa

Der Verlauf der experimentellen Daten kann mit der durchgezogenen Kurve gut beschrieben werden. Diese Kurve wurde folgendermaßen ermittelt. Unter der Annahme, daß sich ein auftreffendes  $SiH_4$ -Molekül an einem Oberflächenplatz entsprechend der Langmuir-Adsorptionsisothermen anlagert und sich zu Silizium und Wasserstoff umsetzt, ergibt sich folgende Gleichung für die Abscheiderate [5]:

$$R = \frac{k_{Si} \cdot \frac{k_1}{k_{-1} + k_{Si}} \cdot n_0 \cdot p_{SiH_4}}{1 + \frac{k_1}{k_{-1} + k_{Si}} \cdot p_{SiH_4}} \quad (4.1)$$

Hierbei bezeichnet  $k_{Si}$  die Ratenkonstante der  $SiH_4$ -Reaktion zu Si und Wasserstoff.  $k_1$  und  $k_{-1}$  sind die Adsorptions- und die Desorptionsratenkonstanten von  $SiH_4$ ,  $n_0$  ist die Gesamtdichte der Adsorptionsplätze auf der Oberfläche, und  $p_{SiH_4}$  ist der Silanpartialdruck. Bei der Herleitung von Gleichung 4.1 wird der Einfluß des Wasserstoffträrgases auf die Adsorptions- und Desorptionsprozesse bei der Siliziumabscheidung nicht berücksichtigt.

Unter der Annahme, daß  $k_{Si} \gg k_{-1}$  ist, vereinfacht sich Gleichung (4.1) zu

$$R = \frac{k_1 \cdot n_0 \cdot p_{SiH_4}}{1 + \frac{k_1}{k_{Si}} \cdot p_{SiH_4}} \quad (4.2a) \quad \text{bzw.} \quad R = \frac{k_{Si} \cdot n_0 \cdot p_{SiH_4}}{\frac{k_{Si}}{k_1} + p_{SiH_4}} \quad (4.2b)$$

Mit Gleichung (4.2b) wurden die experimentellen Daten in Abbildung 4-2 angefitet. Im Ergebnis betragen  $k_{Si} \cdot n_0 = (161 \pm 11)$  nm/min und  $k_{Si}/k_1 = (16,2 \pm 1,8)$  Pa. Für  $p_{SiH_4} \rightarrow \infty$  strebt die Abscheiderate in den Gleichungen (4.2a) und (4.2b) gegen  $k_{Si} \cdot n_0$ , d.h. für die Bedingungen in Abbildung 4-2 ist eine maximale Abscheiderate von  $(161 \pm 11)$  nm/min erreichbar. Mit  $n_0 = 6,7 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  ([100]-Siliziumoberfläche) betragen  $k_{Si} = 24 \text{ nm}^3/\text{min}$  und  $k_1 = 1,48 \text{ nm}^3/(\text{min} \cdot \text{Pa})$ .

## 4.2 SiGe-Abscheidung

### Abscheiderate

Die SiGe-Abscheiderate als Funktion der Temperatur ist in den Abbildungen 4-3a und b für LPCVD- und RPCVD-Prozeßbedingungen dargestellt. Wie im Fall der Si-Abscheiderate beschreibt die Arrheniusgleichung gut den experimentellen Datenverlauf.

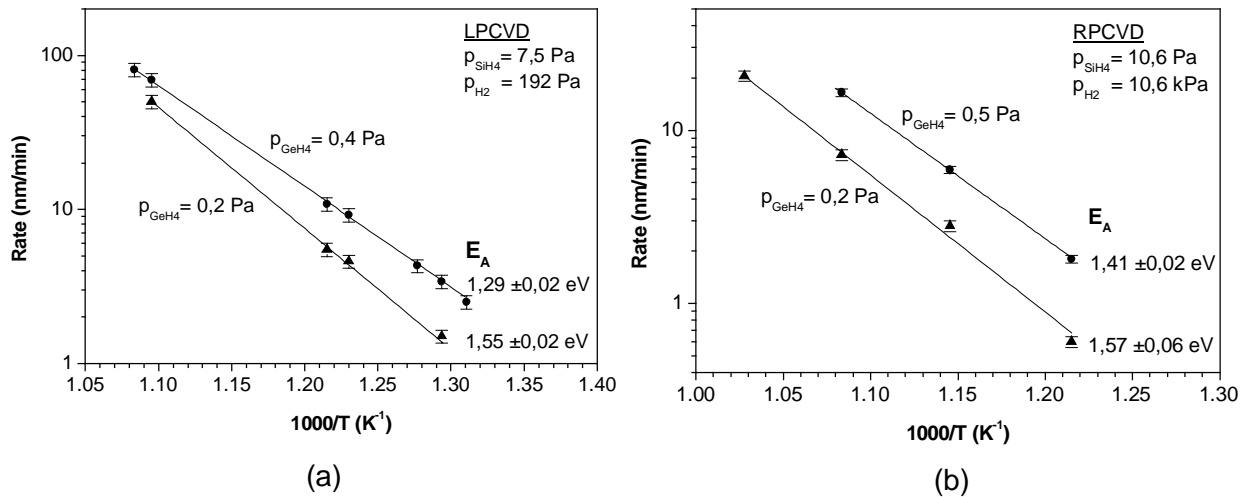


Abbildung 4-3: Temperaturabhängigkeit der SiGe-Abscheiderate für LPCVD-Bedingungen (a) und RPCVD-Bedingungen (b)

Sowohl für LPCVD- als auch für RPCVD-Prozeßbedingungen zeigen die ermittelten Aktivierungsenergien ( $E_A$ ) Abhängigkeiten von den Germanpartialdrücken  $p_{GeH_4}$  bei konstanten Silan- und Wasserstoffpartialdrücken. In beiden Fällen verringert sich die Aktivierungsenergie der SiGe-Abscheidung mit zunehmenden Germanpartialdruck. Bei der Siliziumabscheidung ist die limitierende Reaktion die Wasserstoffdesorption von Siliziumoberflächenplätzen. Im Fall der SiGe-Abscheidung steigert eine Erhöhung von  $p_{GeH_4}$  bei konstantem Silan- und Wasserstoffpartialdruck sowie konstanter Temperatur den Germaniumanteil in der wachsenden SiGe-Schicht und an der Oberfläche. Weil die Germanium-Wasserstoff-Bindung mit einer Bindungsenergie von  $3,0 \text{ eV}$  schwächer als die Silizium-Wasserstoff-Bindung mit  $3,3 \text{ eV}$  ist [6], ist für die Wasserstoffdesorption von einem Germaniumoberflächenplatz eine kleinere Aktivierungsenergie erforderlich. Das führt bei steigender Anzahl von Germaniumoberflächenplätzen zu einer Reduzierung der Aktivierungsenergie der SiGe-Abscheidung, wie sie in den Abbildungen 4-3a und b ersichtlich ist.

Die SiGe-Abscheideraten unter LPCVD- und RPCVD-Bedingungen betragen bei einer Temperatur von  $650^\circ\text{C}$  und  $p_{GeH_4}$  von  $0,2 \text{ Pa}$   $50 \text{ nm/min}$  (LPCVD) bzw.  $7 \text{ nm/min}$  (RPCVD). Die erhöhte LPCVD-Rate läßt sich wie bei der Siliziumabscheidung nur mit dem deutlich geringeren Wasserstoffpartialdruck (Faktor 56 im Vergleich zur RPCVD) erklären. Die unterschiedlichen Wasserstoffpartialdrücke haben keinen Einfluß auf die Aktivierungsenergien (LPCVD:  $E_A = 1,55 \text{ eV}$  für  $p_{GeH_4} = 0,2 \text{ Pa}$ ; RPCVD:  $E_A = 1,57 \text{ eV}$  für  $p_{GeH_4} = 0,2 \text{ Pa}$ ). Demzufolge limitiert die Wasserstoffdesorption von Siliziumoberflächenplätzen und von Germaniumoberflächenplätzen die SiGe-Abscheidung.

### Germaniumeinbau

Im folgenden wird der Germaniumeinbau als Funktion des German-/Silan-Partialdruckverhältnisses für beide Epitaxieprozeßbedingungen betrachtet.

Für LPCVD ist die Abhängigkeit des Germaniumeinbaus vom German-/ Silanpartialdruckverhältnis für verschiedene Temperaturen in Abbildung 4-4 dargestellt.

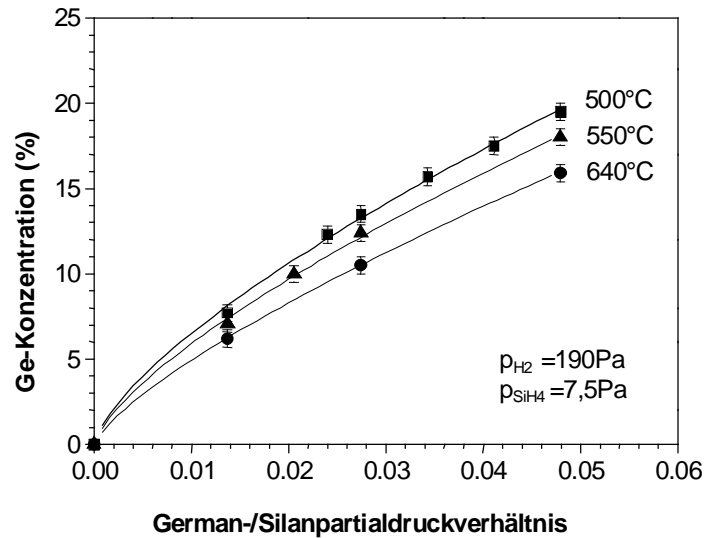


Abbildung 4-4: Germaniumkonzentration als Funktion des German-/Silanpartialdruckverhältnisses für LPCVD

Die Datensätze lassen sich unter Verwendung der empirischen Gleichung

$$x = a \cdot \left( \frac{p_{\text{GeH}_4}}{p_{\text{SiH}_4}} \right)^b \quad (4.3)$$

mit den in Tabelle 4-1 aufgeführten Konstanten a und b beschreiben.

Tabelle 4-1: Koeffizienten zur Beschreibung der Kurvenverläufe in Abbildung 4-4 mit Gleichung 4.3

| Temperatur (°C) | a (%)        | b            |
|-----------------|--------------|--------------|
| 500             | 167,5 ± 14,9 | 0,705 ± 0,03 |
| 550             | 159,5 ± 15,4 | 0,716 ± 0,03 |
| 640             | 156,1 ± 7,0  | 0,750 ± 0,01 |

Aus Abbildung 4-4 kann die Effizienz des Germaniumeinbaus bestimmt werden. Sie errechnet sich aus dem Verhältnis des Germaniumgehalts in der SiGe-Schicht zum  $p_{\text{GeH}_4}/p_{\text{SiH}_4}$ -Verhältnis in der Gasphase. In Tabelle 4-2 ist diese Effizienz für zwei Temperaturen und zwei Germaniumkonzentrationen aufgeführt. Demnach fällt die Effizienz des Germaniumeinbaus mit wachsender Temperatur.

Tabelle 4-2: Effizienz des Germaniumeinbaus für verschiedene Temperaturen und Germaniumkonzentrationen in der Schicht bei  $p_{\text{H}_2}=190$  Pa

| Temperatur (°C) | Ge-Gehalt x (%) | Effizienz (x : $p_{\text{GeH}_4}/p_{\text{SiH}_4}$ ) |
|-----------------|-----------------|--|
| 500             | 0,05            | 6,1  |
|                 | 0,15            | 4,7  |
| 640             | 0,05            | 4,5  |
|                 | 0,15            | 3,4  |

Den Verlauf der Germaniumkonzentration als Funktion des German/Silan-Partialdruckverhältnisses für RPCVD-Bedingungen zeigt Abbildung 4-5.

Der Germaniumeinbau als Funktion des German-Silan-Partialdruckverhältnisses zeigt eine deutliche Temperaturabhängigkeit wie unter LPCVD-Bedingungen (Abbildung 4-4). Bei geringen Temperaturen wird mehr Germanium in die SiGe-Schichten eingebaut, weil die Germaniumabscheiderate gegenüber der Siliziumabscheiderate dominiert. Erhöhte Temperaturen führen zu einem stärkeren Einbau von Siliziumatomen, so daß der Germaniumgehalt kleiner als bei niedrigen Temperaturen ist.

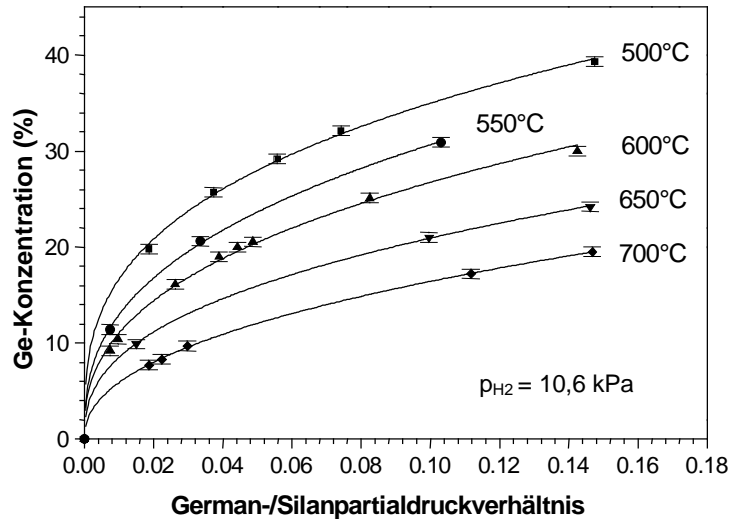


Abbildung 4-5: Germaniumkonzentration in Abhängigkeit des German-/Silanpartialdruckverhältnisses für RPCVD

Die Datenverläufe werden ebenfalls durch die empirische Gleichung 4.3 gut beschrieben, deren Koeffizienten in Tabelle 4-3 aufgeführt sind.

Tabelle 4-3: Koeffizienten zur Beschreibung der Datenpunkte in Abbildung 4-5 mit Gleichung 4.3

| Temperatur (°C) | a (%)      | b           |
|-----------------|------------|-------------|
| 500             | 73,5 ± 1,9 | 0,32 ± 0,01 |
| 550             | 72,7 ± 2,8 | 0,37 ± 0,01 |
| 600             | 64,8 ± 1,8 | 0,38 ± 0,01 |
| 650             | 51,6 ± 2,4 | 0,39 ± 0,02 |
| 700             | 45,9 ± 2,2 | 0,37 ± 0,01 |

Aus Abbildung 4-5 kann wieder die Effizienz des Germaniumeinbaus bestimmt werden. Sie beträgt beispielsweise für 15% Ge bei 700°C 2,1 und bei 500°C 12. Wie unter LPCVD-Bedingungen erhöht sich die Effizienz des Germaniumeinbaus zu niedrigen Temperaturen und kleinen  $p_{\text{GeH}_4}/p_{\text{SiH}_4}$ -Verhältnissen.

Die Temperaturabhängigkeit des Germaniumeinbaus für LPCVD und RPCVD ist in Abbildung 4-6 dargestellt. Für beide Prozeßbedingungen verringert sich die Germaniumkonzentration mit wachsender Temperatur. Dieses Verhalten kann mit einer unterschiedlichen Temperaturabhängigkeit der Haftkoeffizienten von Silan und German erklärt werden [7].

Für LPCVD (Abbildung 4-6a) ist die Abhängigkeit des Germaniumeinbaus von der Temperatur mit -2%/100°C geringer als für RPCVD (-5,9%/100°C; Abbildung 4-6b).

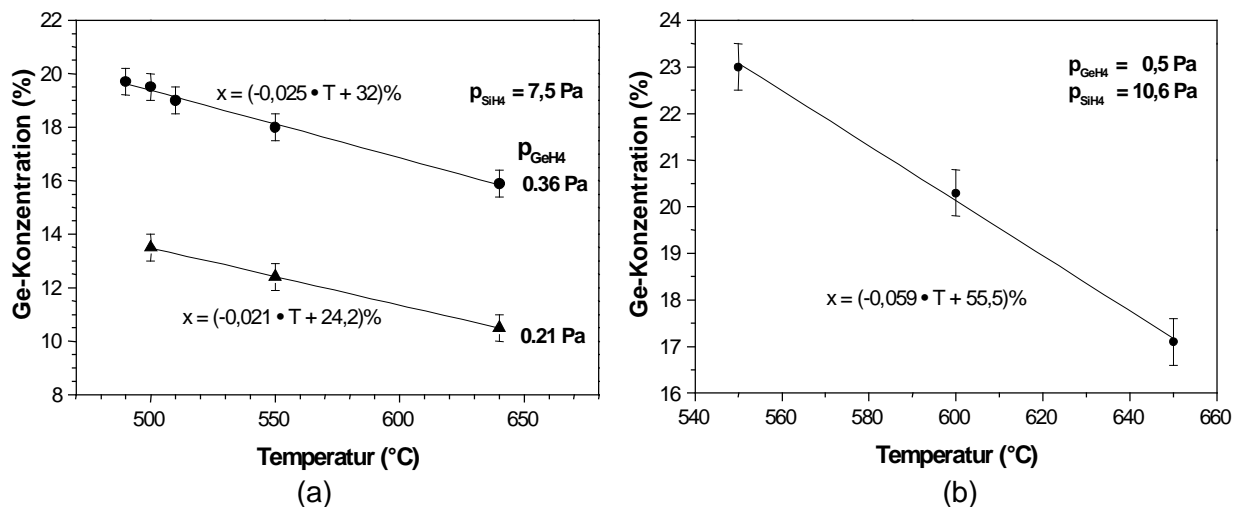


Abbildung 4-6: Germaniumkonzentration als Funktion der Temperatur für LPCVD (a) und RPCVD (b)

Die LPCVD- und die RPCVD-Prozeßbedingungen unterscheiden sich deutlich im Wasserstoffpartialdruck (LP-/RPCVD: 192/10600 Pa). Hinsichtlich des German-Silan-Partialdruckverhältnisses sind die Unterschiede zwischen LPCVD- und RPCVD zu gering, als daß sie die Differenz in der Temperaturabhängigkeit der Germaniumkonzentration erklären können. Demnach resultiert diese Differenz aus unterschiedlichen Wasserstoffpartialdrücken.

### Boreinbau in SiGe-Schichten

Das Borprofil des HBT-Basisgebiets beeinflusst sowohl die dynamischen als auch die statischen Transistorparameter. Mit dem LPCVD- und dem RPCVD-Epitaxieverfahren ist es möglich, Borprofile in SiGe-Schichten mit sehr steilen Borkonzentrationsgradienten und sehr hohen Bordotierungen abzuscheiden [8, 9]. Als Quellgas wird Diboran ( $\text{B}_2\text{H}_6$ ) verwendet, das bei thermischer Aktivierung relativ schnell zerfällt. Bor kann über einen weiten Konzentrationsbereich in SiGe eingebaut werden. Abbildung 4-7 stellt die Abhängigkeit der mit SIMS bestimmten Borkonzentration vom Diboran-Silan-Verhältnis in der Gasphase für beide untersuchte Epitaxieprozeßbedingungen dar.

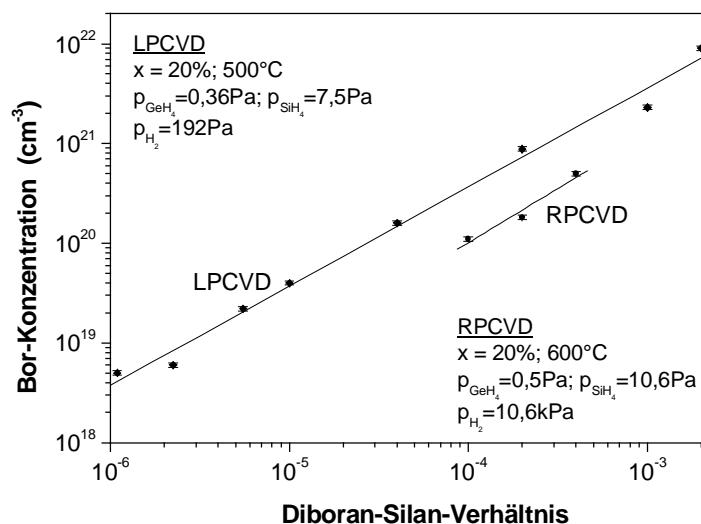


Abbildung 4-7: SIMS-Borkonzentration in SiGe-Schichten in Abhängigkeit vom Diboran-Silan-Verhältnis für LPCVD- und RPCVD-Bedingungen



Für LPCVD- und RPCVD-Bedingungen besteht ein linearer Zusammenhang zwischen Bor-konzentration in der Schicht und dem  $B_2H_6/SiH_4$ -Verhältnis in der Gasphase. Im Fall der RPCVD-Bedingungen wird gegenüber LPCVD bei gleichem  $B_2H_6/SiH_4$ -Verhältnis weniger Bor in die SiGe-Schicht eingebaut. Ursache dafür sind die unterschiedlichen Wasserstoff-partialdrücke (LP-/RPCVD: 190/10600 Pa).

## 5 Bewertung von HBT-Parametern

In Kapitel 5 wird zunächst die Homogenität und die Reproduzierbarkeit der HBT-Parameter Emitter-Basis-Raumladungszone  $X_{EB}$  (Abschnitt 5.1), innerer Basisschichtwiderstand  $R_{S_{Bi}}$  (Abschnitt 5.2) und Kollektorstrom  $I_C$  (Abschnitt 5.3) untersucht. Da diese Parameter entscheidend durch Epitaxieschichteigenschaften wie die Dicke der abgeschiedenen Siliziumdeckschicht (wesentlich für  $X_{EB}$ ), das B-Profil in der SiGe-Schicht (wesentlich für  $R_{S_{Bi}}$  und  $I_C$ ) und das Ge-Profil (wesentlich für  $I_C$ ) beeinflusst werden, erlaubt diese Untersuchung eine direkte Bewertung der Homogenität und Reproduzierbarkeit der verwendeten Epitaxieprozesse. Außerdem ermöglicht sie den Rückschluß auf jene kritischen Einflußgrößen des Epitaxieprozesses, die für die Streuungen der jeweiligen HBT-Parameter verantwortlich sind. Im Kapitel 5.4 erfolgt dann eine Bewertung der Qualität der Epitaxieschichten anhand Leckstrom begrenzter Ausbeuten von HBTs.

Die erhaltenen Ergebnisse zur Streuung der HBT-Parameter und die ermittelten Leckstrom begrenzten HBT-Ausbeuten werden mit verfügbaren Daten von UHVCVD-HBTs verglichen. Auf diese Weise erhalten wir eine Leistungseinschätzung von LPCVD- und RPCVD-basierten Epitaxieverfahren im Vergleich zum etablierten UHVCVD-Verfahren.

### 5.1 Bewertung der Siliziumdeckschichtabscheidung anhand der Emitter-Basis-Raumladungsweite $X_{EB}$

Die Emitter-Basis-Raumladungsweite  $X_{EB}$  beeinflusst sowohl dynamische HBT-Parameter wie die Transitfrequenz  $f_T$  als auch statische HBT-Parameter wie den Emitter-Basis-Diodenleckstrom.  $X_{EB}$  wird durch das Emitterdotierungsprofil, die Siliziumdeckschichtdicke und durch das B-Profil des HBT-Schichtstapels definiert.

Im ersten Teil dieses Abschnitts erfolgt die statistische Bewertung und der Vergleich von  $X_{EB}$  des HBT1- und des HBT3-Profiles, die unter Verwendung des LPCVD- bzw. des RPCVD-Epitaxieverfahrens hergestellt wurden. Im zweiten Teil werden kritische Faktoren bestimmt, die die Wafer-zu-Wafer-Reproduzierbarkeit und die Homogenität über den Wafer von  $X_{EB}$  beeinflussen.

#### 5.1.1 $X_{EB}$ -Mittelwerte und -Streuungen für verschiedene HBTs und Epitaxieverfahren

Abbildung 5.1-1a zeigt den  $X_{EB}$ -Verlauf des LPCVD-basierten HBT1, und Abbildung 5.1-1b stellt den  $X_{EB}$ -Verlauf des RPCVD-basierten HBT3 dar.

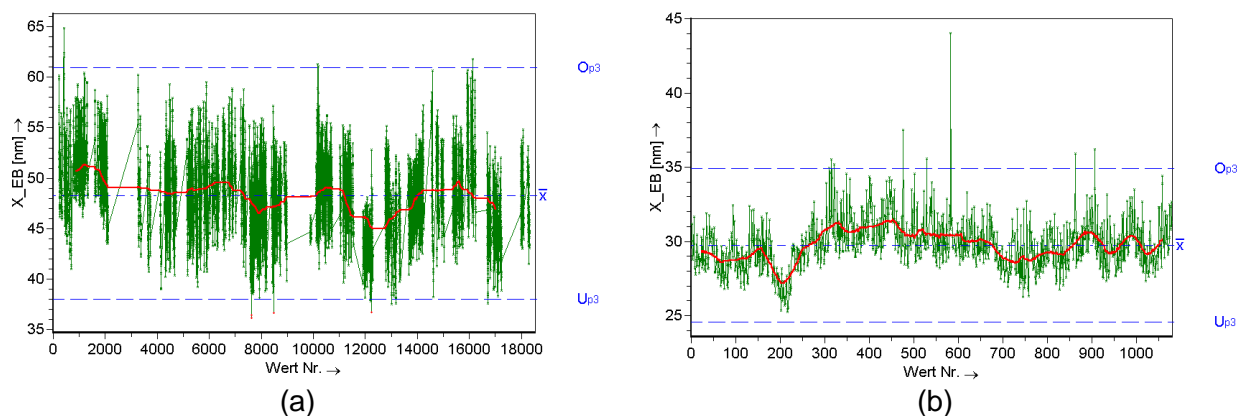


Abbildung 5.1-1:  $X_{EB}$ -Verlauf für HBT1(a) und HBT3 (b)

Neben dem Mittelwert  $\bar{x}$ , sind in den Abbildungen 5.1-1a und b das obere und das untere Quantil ( $O_{p3}$ ,  $U_{p3}$ ) eingefügt. Die Quantile  $O_{p3}$  und  $U_{p3}$  kennzeichnen den Bereich der Verteilungsfunktion, in dem 99,73% aller Stichproben enthalten sind. Damit ist er dem  $6\sigma$ -Bereich der Normalverteilung äquivalent.

Im Fall des HBT1 ergibt sich ein Mittelwert von 48,3nm und eine  $1\sigma$ -äquivalente Streuung von 3,8nm bzw. 7,8% (auf den Mittelwert normiert). Der  $X_{EB}$ -Mittelwert des HBT3 liegt bei 29,7nm mit einer  $1\sigma$ -äquivalenten Streuung von 1,7nm bzw. 5,6%. Die unterschiedlichen Mittelwerte sind durch die Differenzen der Siliziumdeckschicht der beiden HBT-Profile zu erklären, die beim HBT1 60nm und beim HBT3 45nm betragen.

Es wird nun untersucht, wie sich die Reproduzierbarkeit von Wafer zu Wafer und die Homogenität über den Wafer der Emitter-Basis-Raumladungsweite für den HBT1 und den HBT3 verhalten. In Abbildung 5.1-2a ist die  $\bar{x}$ -s-Karte von  $X_{EB}$  für den HBT1 dargestellt.

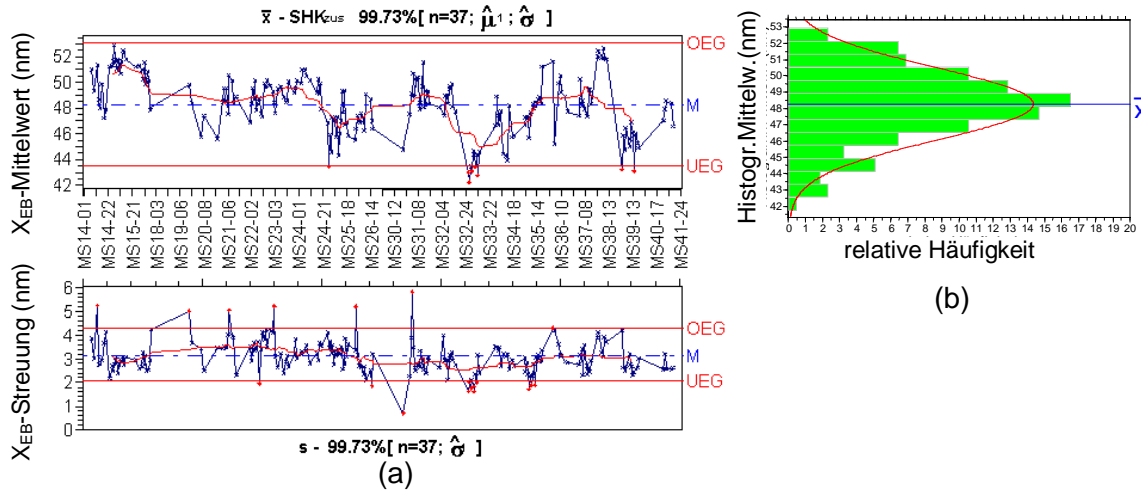


Abbildung 5.1-2:  $\bar{x}$ -s-Regelkarte von  $X_{EB}$  des HBT1 (a) und Histogramm der  $X_{EB}$ -Wafermittelwerte (b)

In ihr sind im oberen Teil der Verlauf der Wafermittelwerte ( $\bar{x}$ ) und im unteren der Verlauf der Waferstreuwerte (s) dargestellt. Ferner sind die Mittellinie M sowie die untere und obere Eingriffsgrenze (OEG, UEG) gekennzeichnet. Aus dem Verlauf der  $X_{EB}$ -Mittelwerte ergibt sich ein arithmetischer Mittelwert  $\bar{\bar{x}}$  von 48,3 nm (Abbildung 5.1-2b) und aus der Verteilungsfunktion resultiert eine  $1\sigma$ -äquivalente Wafer-zu-Wafer-Streuung von 2,5nm bzw. 5,2%. Der Verlauf der  $X_{EB}$ -Streuwerte über den Wafer besitzt eine durchschnittliche Streuung von 3,1nm bzw. 6,5% (Abbildung 5.1-2a). Allgemein ist der  $X_{EB}$ -Verlauf der Mittel- und Streuwerte des HBT1 von Periodizitäten aufeinanderfolgender Wafer gekennzeichnet, die teilweise zu Verletzungen der Eingriffsgrenzen führen. Dieses Verhalten ist besonders bei den Streuungen über den Wafer auffällig.

Für den HBT3 ist der entsprechende  $\bar{x}$ -s-Verlauf von  $X_{EB}$  mit dem korrespondierenden Histogramm der Mittelwerte und seiner Verteilungsfunktionen in Abbildung 5.1-3 dargestellt.

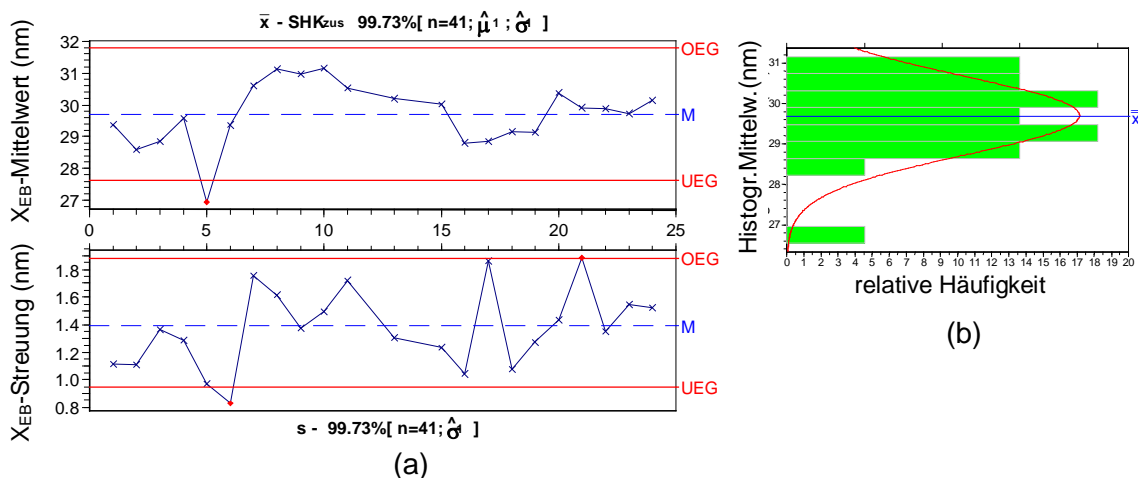


Abbildung 5.1-3:  $\bar{x}$ -s-Regelkarte von  $X_{EB}$  des HBT3 (a) und Histogramm der  $X_{EB}$ -Wafermittelwerte (b)

Aus dem Mittelwertverlauf ergibt sich ein arithmetischer Mittelwert  $\bar{x}$  von 29,7nm mit einer Wafer-zu-Wafer-Streuung von 0,7nm ( $1\sigma$ ) bzw. 2,3%. Die durchschnittliche Streuung über den Wafer beträgt 1,4nm bzw. 4,8%.

Eine Zusammenfassung der Mittelwerte und Streuungen des HBT1 und HBT3 befindet sich in Tabelle 5.1-1. Die Streuungen des HBT3 sind kleiner als die des HBT1. Dies gilt besonders für die Wafer-zu-Wafer-Streuung, deren Ursachen im folgenden Abschnitt näher untersucht werden.

Tabelle 5.1-1  $X_{EB}$ -Mittelwerte und -Streuungen des HBT1 und HBT3

| $X_{EB}$ (nm)  | LPCVD-Epitaxie |           |               | RPCVD-Epitaxie |           |               |
|----------------|----------------|-----------|---------------|----------------|-----------|---------------|
|                | HBT1           |           |               | HBT3           |           |               |
|                | Mittelwert     | $1\sigma$ | $1\sigma$ (%) | Mittelwert     | $1\sigma$ | $1\sigma$ (%) |
| alle Werte     | 48,3           | 3,8       | 7,9           | 29,7           | 1,7       | 5,6           |
| Wafer zu Wafer | 48,3           | 2,5       | 5,2           | 29,7           | 0,7       | 2,3           |
| über den Wafer | 48,3           | 3,1       | 6,5           | 29,7           | 1,4       | 4,8           |

### 5.1.2 Kritische Einflußfaktoren auf $X_{EB}$

Das Ziel dieses Abschnittes besteht darin, kritische Einflußfaktoren zu diskutieren, die für die ermittelten  $X_{EB}$ -Streuungen verantwortlich sind. Im einzelnen wird der Einfluß von Temperungen untersucht. Ferner wird die Wafer-zu-Wafer-Streuung der Siliziumdeckschichtdicke bestimmt und zur  $X_{EB}$ -Streuung in Beziehung gesetzt. Für die  $X_{EB}$ -Waferstreuung erfolgt eine qualitative Diskussion.

#### Einfluß von Temperungen auf $X_{EB}$

Das endgültige Arsendotierprofil des Polysiliziumemitters und das des Basis-Borprofils wurden durch RTA-Temperungen eingestellt. Temperaturschwankungen des RTA-Prozesses beeinflussen die Ausdiffusion des Arsens aus dem Polysiliziumemitter und des Bors aus der SiGe-Basis in die schwach dotierte Emitterregion und bewirken  $X_{EB}$ -Streuungen. Im folgenden soll der Einfluß dieser Temperungen auf  $X_{EB}$  am Beispiel des HBT1 untersucht werden. Dazu erfolgte in einem speziellen Los eine Variation der RTA-Temperatur im Bereich von 1000°C (Standard) bis 1030°C. Die resultierenden Emitter-Basis-Raumladungsweiten sind in Abbildung 5.1-4 dargestellt. Die Temperaturabhängigkeit von  $X_{EB}$  beträgt etwa -0,25nm/°C.

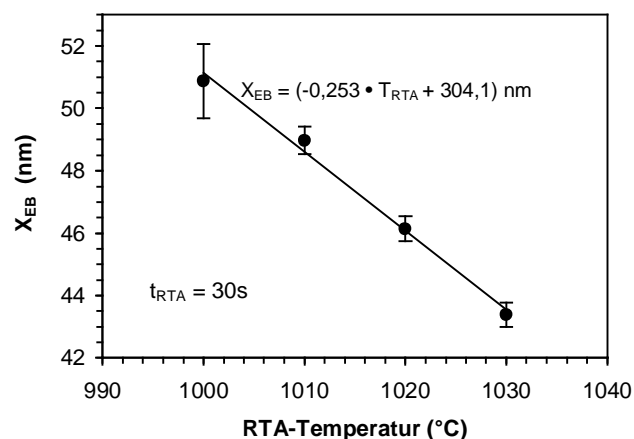


Abbildung 5.1-4: Einfluß der RTA-Temperatur auf  $X_{EB}$  für HBT1

### Einfluß der Siliziumabscheidung auf die $X_{EB}$ -Reproduzierbarkeit

Der Einfluß der Siliziumdeckschichtdicke von HBTs auf  $X_{EB}$  wird nun an einem ausgewählten Chip (Mittelchip) pro Wafer untersucht. In Abbildung 5.1-5 sind der  $X_{EB}$ - und der  $d_{Si-Cap}$ -Verlauf des HBT1 gegenübergestellt.

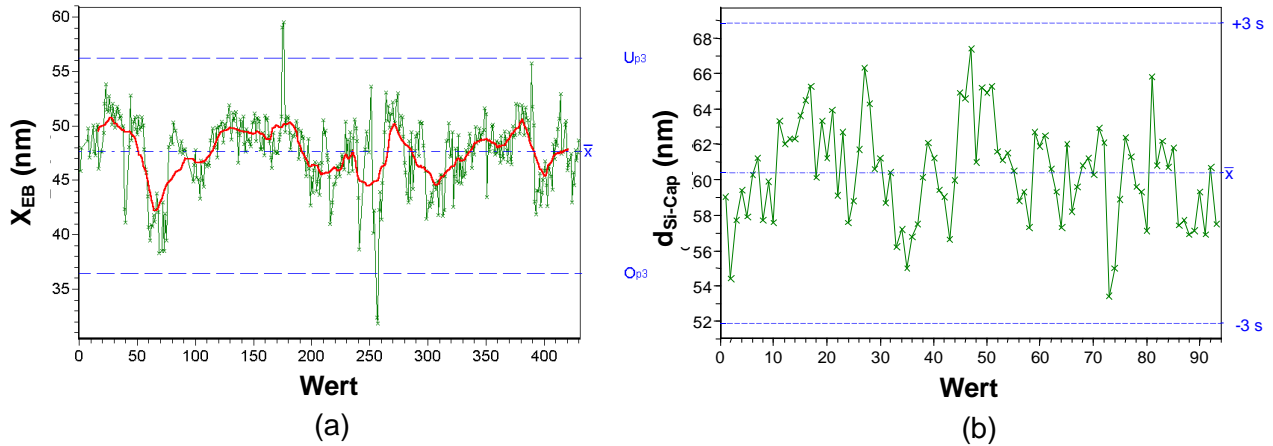


Abbildung 5.1-5:  $X_{EB}$ -Verlauf (a) und  $d_{Si-Cap}$ -Verlauf (b) des HBT1

Beide Verläufe weisen deutliche Streuungen aufeinanderfolgender Wafer auf. Die resultierenden Mittelwerte und Streuungen von  $X_{EB}$  und  $d_{Si-Cap}$  sind in Tabelle 5.1-2 zusammengefaßt. Aus dem Vergleich der Streuungen folgt, daß die  $X_{EB}$ -Wafer-zu-Wafer-Streuung hauptsächlich von der  $d_{Si-Cap}$ -Streuung verursacht wird.

Tabelle 5.1-2: Wafer-zu-Wafer-Mittelwerte und -Streuungen der Emitter-Basis-Raumladungsweite und der Siliziumdeckschichtdicke des HBT1

| $X_{EB}$   |           |           | $d_{Si-Cap}$ |           |           |
|------------|-----------|-----------|--------------|-----------|-----------|
| Mittelwert | $1\sigma$ | $1\sigma$ | Mittelwert   | $1\sigma$ | $1\sigma$ |
| nm         | nm        | %         | nm           | nm        | %         |
| 48,3       | 2,5       | 5,2       | 60,4         | 2,8       | 4,6       |

Zur Bestimmung der Ursache für die Streuungen der Siliziumdeckschichtdicke werden nun die äquivalenten Streuungen der Epitaxieprozeßparameter Temperatur bzw. Silanpartialdruck ermittelt. Dafür werden die Abhängigkeiten der Siliziumabscheiderate von der Temperatur bzw. vom Silanpartialdruck für die LPCVD-Prozeßbedingungen gemäß Kapitel 4 verwendet. Die Wafer-zu-Wafer-Temperaturstreuung wird auf Grundlage der  $6\sigma$ - $d_{Si-Cap}$ -Streuung berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.1-3 dargestellt. Die  $6\sigma$ - $d_{Si-Cap}$ -Streuung von 16,8 nm wurde mit der Arrheniusgleichung (2.6) unter Verwendung der ermittelten Aktivierungsenergie von 1,9eV (Abbildung 4-1) in eine Temperaturdifferenz umgerechnet. Im Ergebnis entspricht die  $6\sigma$ - $d_{Si-Cap}$ -Streuung einer Temperaturstreuung von 12,1°C. Ferner wurde die Schichtdickenstreuung mit Gleichung 4.2 in eine Streuung des Silanpartialdrucks umgerechnet. Die resultierende äquivalente Streuung des Silanpartialdrucks von 3,0Pa ist bezogen auf den Zielwert von 7,5Pa unrealistisch hoch. Wesentlich wahrscheinlicher ist die Tatsache, daß die  $d_{Si-Cap}$ -Streuung hauptsächlich durch die Streuung der Abscheidetemperatur verursacht wird.

Tabelle 5.1-3: Wafer-zu-Wafer-Streuungen der Siliziumdeckschichtdicke des HBT1 und äquivalente Streuungen der Temperatur und des Silanpartialdrucks

| Parameter    | $6\sigma$ -Streuung | äquivalente $6\sigma$ Streuung |                  |
|--------------|---------------------|--------------------------------|------------------|
|              | (nm)                | Temperatur (°C)                | $p_{SiH_4}$ (Pa) |
| $d_{Si-Cap}$ | 16,8                | 12,1                           | 3,0              |

In den Abbildungen 5.1-6a und b sind der  $X_{EB}$ - und der  $d_{Si-Cap}$ -Verlauf des HBT3 dargestellt.

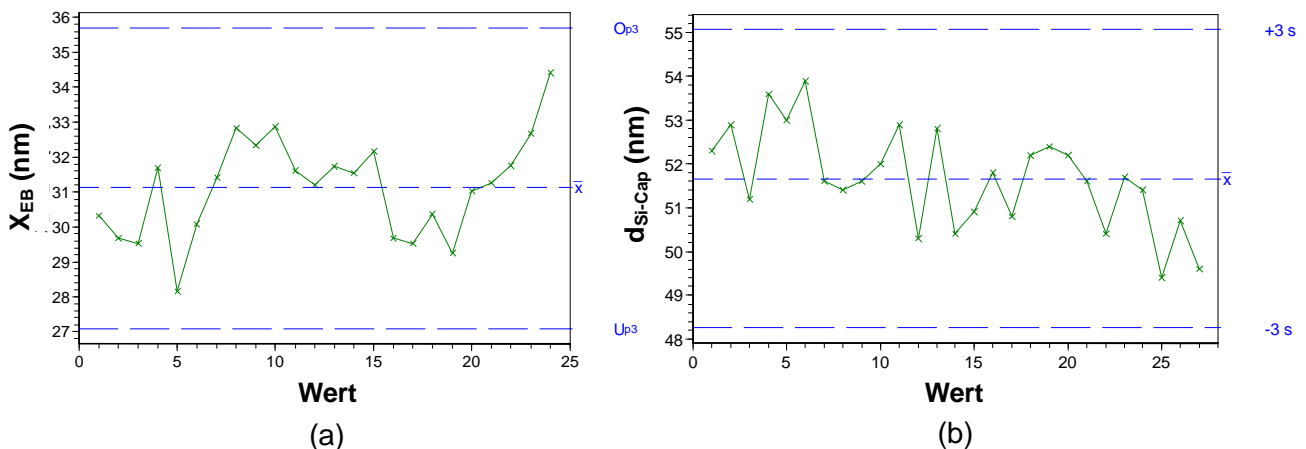


Abbildung 5.1-6:  $X_{EB}$ -Verlauf (a) und  $d_{Si-Cap}$ -Verlauf (b) des HBT3

Die resultierenden Wafer-zu-Wafer-Mittelwerte und Wafer-zu-Wafer-Streuungen sind in Tabelle 5.1-4 zusammengefaßt.

Tabelle 5.1-4: Wafer-zu-Wafer-Mittelwerte und -Streuungen der Emitter-Basis-Raumladungsweite und der Siliziumdeckschichtdicke des HBT3

| $X_{EB}$   |           |           | $d_{Si-Cap}$ |           |           |
|------------|-----------|-----------|--------------|-----------|-----------|
| Mittelwert | $1\sigma$ | $1\sigma$ | Mittelwert   | $1\sigma$ | $1\sigma$ |
| nm         | nm        | %         | nm           | nm        | %         |
| 27,6       | 1         | 3,4       | 51,7         | 1,1       | 2,1       |

Unter Verwendung der Arrheniusgleichung (2.6) mit  $E_A=1,9\text{eV}$  (Abbildung 4-1) entspricht die  $6\sigma$ -Streuung der Siliziumdeckschichtdicke einer äquivalenten Temperaturstreuung von  $4,7^\circ\text{C}$ . Damit ist die äquivalente Temperaturstreuung des RPCVD-Reaktors um einen Faktor 2,5 kleiner als die des LPCVD-Reaktors. Der Suszeptor, mit dem der Wafer im RPCVD-Reaktor aufgeheizt wird, führt offensichtlich zu einer besseren Wafer-zu-Wafer-Reproduzierbarkeit der Temperatur und damit zu einer reproduzierbareren Siliziumdeckschichtdicke.

### **Einflußfaktoren auf die $X_{EB}$ -Homogenität über den Wafer**

Im folgenden behandeln wir den Einfluß der  $d_{Si-Cap}$ -Verteilung auf die  $X_{EB}$ -Homogenität über den Wafer. Die Streuungen der  $X_{EB}$ - und der  $d_{Si-Cap}$ -Waferverteilung werden unter Verwendung der Abhängigkeiten in Kapitel 4 in äquivalente Streuungen der Temperatur umgerechnet. Anhand der Waferverteilungen werden Einflußgrößen auf  $X_{EB}$  diskutiert. Die  $d_{Si-Cap}$ -Verteilung des LPCVD-basierten HBT1 wurde mit Röntgenbeugung (Abschnitt 3.4) ermittelt. Die  $d_{Si-Cap}$ -Verteilung des RPCVD-basierten HBT3 wurde mittels spektroskopischer Ellipsometrie bestimmt [1].

Für den HBT1 sind die  $X_{EB}$ - und  $d_{Si-Cap}$ -Verteilungen in Abbildung 5.1-7 dargestellt. Die  $X_{EB}$ -Verteilung verfügt über einen Mittelwert von  $47,8\text{nm}$  und eine  $1\sigma$ -Streuung von  $2,2\text{nm}$  bzw.  $4,7\%$ . Diese Streuung ist geringfügig kleiner als die durchschnittliche Wafer-zu-Wafer-Streuung aller untersuchten HBTs (Tabelle 5.1-1). Der Mittelwert der  $d_{Si-Cap}$ -Verteilung beträgt  $59,5\text{nm}$  und die  $1\sigma$ -Streuung beträgt  $4,5\text{nm}$  bzw.  $7,5\%$ .

## 5.1 - Bewertung der Siliziumdeckschichtabscheidung anhand $X_{EB}$

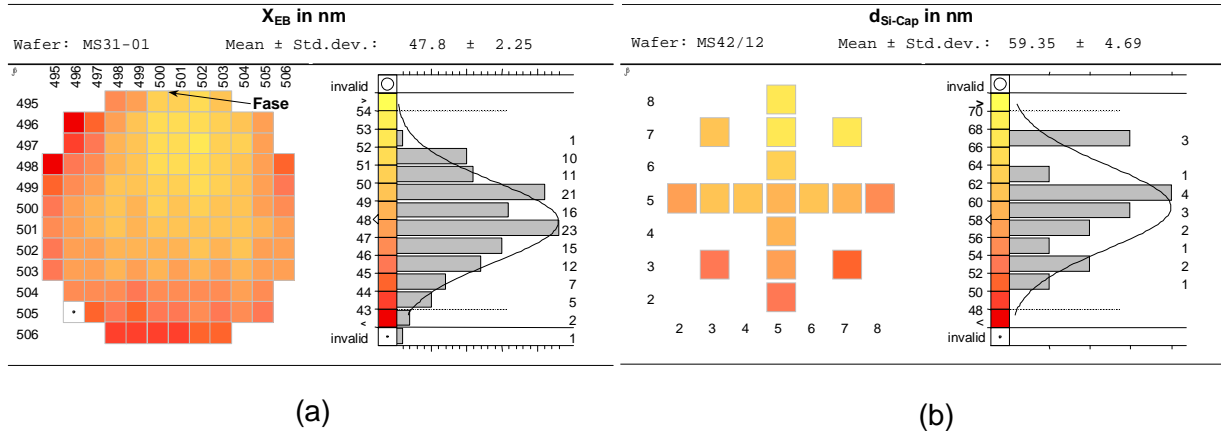


Abbildung 5.1-7:  $X_{EB}$ -Verteilung (a) und Verteilung der Siliziumdeckschichtdicke  $d_{Si-Cap}$  (b) des HBT1

Im folgenden wurde die  $X_{EB}$ -Streuung über den Wafer (siehe Tabelle 5.1-1) in äquivalente Streuungen von Parametern der RTA-Temperatur (Temperatur) sowie des Siliziumepitaxieprozesses (Temperatur und Silanpartialdruck) umgerechnet (Tabelle 5.1-5), um Einflußfaktoren auf die  $X_{EB}$ -Homogenität zu ermitteln.

Tabelle 5.1-5:  $X_{EB}$ -Streuung über den Wafer (nach Tabelle 5.1-1) mit äquivalenten Streuungen des RTA-Schrittes und des LPCVD-Siliziumepitaxieprozesses

| 6 $\sigma$ -Streuung | äquivalente 6 $\sigma$ Streuung |              |                        |
|----------------------|---------------------------------|--------------|------------------------|
| $X_{EB}$ (HBT1)      | T(RTA)                          | T (Epitaxie) | $p_{SiH_4}$ (Epitaxie) |
| 18,6 nm              | 74°C                            | 16°C         | 4,1 Pa                 |

Eine RTA-Temperaturstreuung von 74°C ist unrealistisch hoch. Demnach ist sie als wesentliche Einflußgröße auf die  $X_{EB}$ -Streuung auszuschließen. Gleiches gilt für die äquivalente  $p_{SiH_4}$ -Streuung. Bezogen auf den Sollwert von 7,5 Pa entspricht dieser Wert 54%. Die wesentliche Einflußgröße ist die Temperaturverteilung über den Wafer bei der Siliziumepitaxie. Die größte Schichtdicke ist in Abbildung 5.1-7 b an der Fase zu verzeichnen. Verursacht wird die Schichtdickenverteilung durch den Siliziumkarbidring, der den Wafer zur Kompensation der Waferrandabstrahlung umgibt. An der Fase ist dieser Ring zur Anpassung an die Geometrie des Wafers verstärkt. Dieser Teil des Rings koppelt insbesondere bei langen Prozeßzeiten einen erhöhten Anteil Infrarotstrahlung in den Wafer ein, so daß sich an dieser Stelle eine erhöhte Wafertemperatur einstellt, die eine erhöhte Schichtdicke und eine „epitaxietytische“-Dickenverteilung bewirkt. Diese „epitaxietytische“-Verteilung ist in der  $X_{EB}$ -Verteilung in Abbildung 5.1-7 a wiederzuerkennen.

Neben der "epitaxietytischen" (Abbildung 5.1-7a) sind auch "epitaxieuntypische"  $X_{EB}$ -Waferverteilungen zu beobachten. Ein Beispiel ist in Abbildung 5.1-8 ersichtlich. Dabei liegt das  $X_{EB}$ -Maximum im rechten unteren Quadranten. Demzufolge wird die  $X_{EB}$ -Verteilung nicht nur von der Siliziumdeckschichtdicke sondern durch weitere Prozeßparameter wie die RTA-Temperaturverteilung beeinflusst. Im Ergebnis verfügt der Wafer MS26-02 über eine größere  $X_{EB}$ -Streuung von 5,2nm (10,8%) über den Wafer als der Durchschnittswert von 3,2nm (6,6%) aller Stichproben.



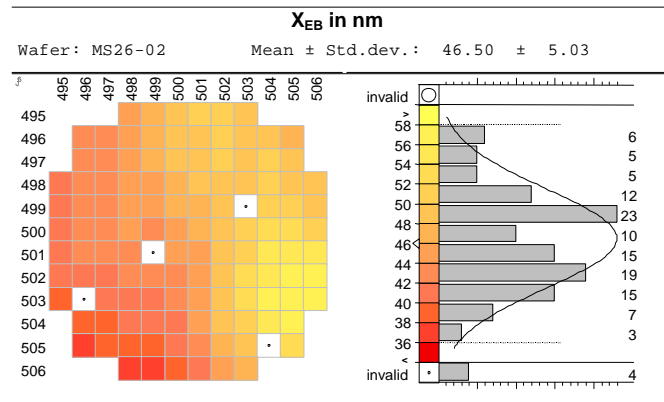


Abbildung 5.1-8:  $X_{EB}$ -Verteilung von Wafer MS26-02 mit HBT1

In den Abbildungen 5.1-9a und b ist für den HBT3 eine  $X_{EB}$ -Verteilung einer  $d_{Si-Cap}$ -Verteilung gegenübergestellt. Die auf den entsprechenden  $X_{EB}$ -Mittelwert normierte  $1\sigma$ - $X_{EB}$ -Streuung über den Wafer von 3,8% ist mit der  $1\sigma$ - $d_{Si-Cap}$ -Streuung von 3,9% vergleichbar. Daraus folgt, daß die Streuung der Emitter-Basis-Raumladungsweite hauptsächlich von der Verteilung der Siliziumdeckschichtdicke dominiert wird.

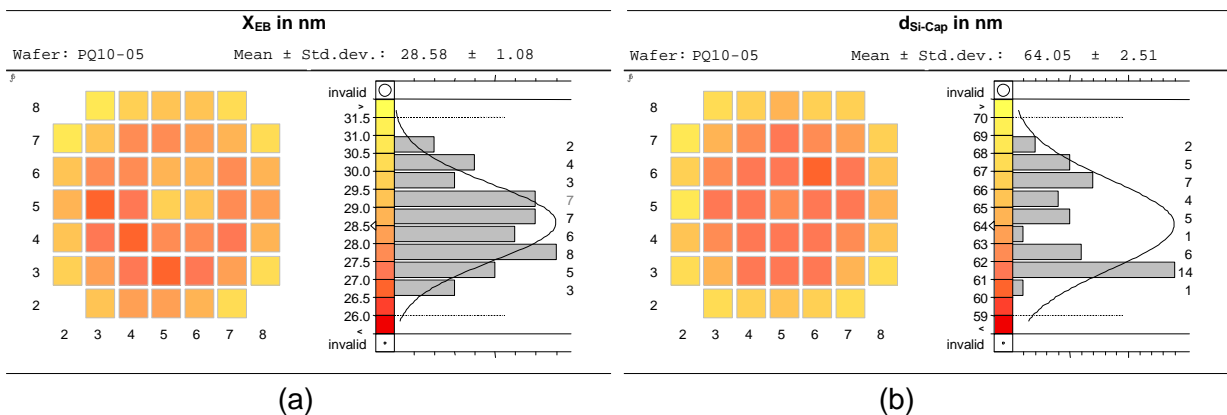


Abbildung 5.1-9:  $X_{EB}$ -Verteilung (a) und Verteilung der Siliziumdeckschichtdicke (b) des RPCVD-basierten HBT3

Die Bewertung der LPCVD-Epitaxie hat ergeben, daß die Abscheidetemperatur den größten Einfluß auf die Siliziumabscheiderate hat. Aus diesem Grund wurde für das RPCVD-Epitaxieverfahren die  $X_{EB}$ -Streuung über den Wafer gemäß Tabelle 5.1-1 in eine äquivalente Temperaturstreuung umgerechnet. Danach entspricht die  $6\sigma$ - $X_{EB}$ -Streuung des HBT3 von 8,4nm einer Temperaturstreuung von 12°C über den Wafer.

Vergleicht man die Temperaturstreuungen von Wafer zu Wafer mit denen über den Wafer, so sind sie im Fall des LPCVD-Reaktors in der gleichen Größenordnung. Für den RPCVD-Reaktor ist die Reproduzierbarkeit der Temperatur von Wafer zu Wafer besser als die Temperaturstreuung über den Wafer.

#### **Fazit der Bewertung der Siliziumdeckschichtabscheidung anhand $X_{EB}$**

Die Reproduzierbarkeit und die Homogenität von  $X_{EB}$  RPCVD-basierter HBTs ist besser als die LPCVD-basierter (Tabelle 5.1-1). Insbesondere ist die  $X_{EB}$ -Wafer-zu-Wafer-Streuung von RPCVD-HBTs deutlich kleiner als die der LPCVD-HBTs. Als wesentlicher Einflußfaktor auf die  $X_{EB}$ -Streuungen hat sich die epitaktische Abscheidung der Si-Deckschicht erwiesen. Diese wird im wesentlichen durch die Reproduzierbarkeit und Homogenität der Abscheidetemperatur beeinflusst.



## 5.2 Bewertung der epitaktischen Bordotierung der SiGe-Schichten anhand der inneren Basisschichtwiderstände $R_{Sbi}$

Das Borprofil der HBT-Basisregion beeinflusst sowohl die statischen als auch die dynamischen Transistoreigenschaften. Es bestimmt zusammen mit dem SiGe-Profil den Kollektorstrom  $I_C$ . Das Borprofil definiert die Basisweite und hat somit direkten Einfluß auf die Transitfrequenz  $f_T$ . Schließlich beeinflusst das Borprofil über  $R_B$  und  $f_T$  auch die maximale Schwingfrequenz  $f_{max}$ . Der innere Basisschichtwiderstand  $R_{Sbi}$  eines HBTs kann durch die folgende Beziehung

$$\frac{1}{R_{Sbi}} = q \int \mu(x) \cdot p(x) dx \quad (5.2-1)$$

berechnet werden, wobei  $q$  die Elementarladung,  $\mu(x)$  die ortsabhängige Beweglichkeit der Löcher in der SiGe-Basis und  $p(x)$  das ortsabhängige Löcherprofil sind. Da das Löcherprofil  $p(x)$  in erster Linie durch das Borprofil eingestellt wird, eignet sich  $R_{Sbi}$  sehr gut zur Bewertung der Homogenität und Reproduzierbarkeit der epitaktischen Bordotierung.

### 5.2.1 $R_{Sbi}$ -Mittelwerte und -Streuungen für verschiedene HBTs und Epitaxieverfahren

#### HBT1 mit LPCVD-Epitaxie

Zunächst werden die statistischen Kenngrößen von  $R_{Sbi}$  des HBT1 ermittelt und diskutiert. In Abbildung 5.2-1 sind der Einzelwertverlauf und die Häufigkeitsverteilung aller betrachteten  $R_{Sbi}$ -Werte dargestellt. Das Histogramm läßt sich gut mit der Kurve der logarithmischen Normalverteilung beschreiben. Der  $R_{Sbi}$ -Mittelwert beträgt 5087  $\Omega$  und die äquivalente  $1\sigma$ -Streuung 786  $\Omega$ . Auf den Mittelwert bezogen, entspricht die Streuung 15%.

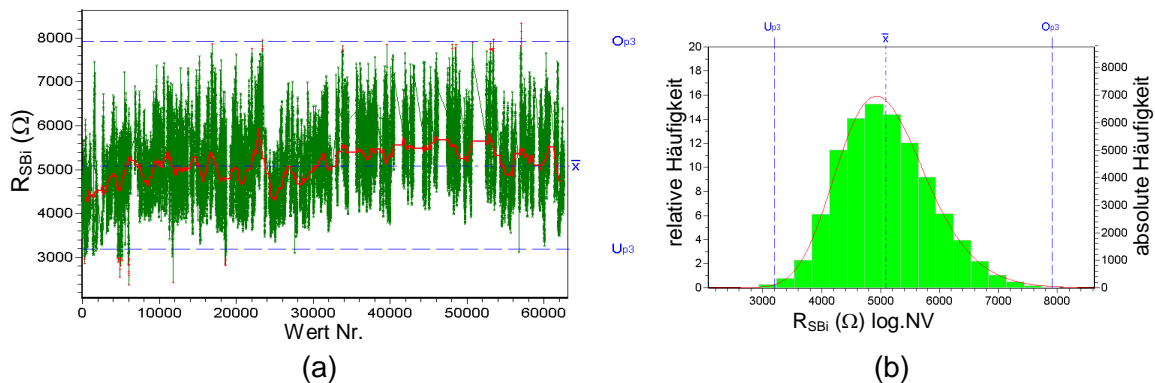


Abbildung 5.2-1:  $R_{Sbi}$ -Einzelwertverlauf des mittels LPCVD-Epitaxie hergestellten HBT1 (a) und  $R_{Sbi}$ -Häufigkeitsverteilung mit Verteilungsfunktion (b)

Zur Ermittlung der Streuungen über den Wafer und von Wafer zu Wafer eignet sich die  $\bar{x}$ -s-Regelkarte (Abbildung 5.2-2a) sehr gut. In ihr weisen der Mittel- und der Streuwerteverlauf auf eine Drift von  $R_{Sbi}$  hin, die durch den Kurvenverlauf des gleitenden Mittelwertes verdeutlicht wird. Die Häufigkeitsverteilung der  $R_{Sbi}$ -Mittelwerte wird in Abbildung 5.2-2b mit einer Mischverteilung gut beschrieben, die die Drift der Mittelwerte in Form zweier Maxima widerspiegelt. Aus dieser Verteilung ergibt sich ein Wafer-zu-Wafer-Mittelwert von 5080  $\Omega$  und eine durchschnittliche Wafer-zu-Wafer-Streuung von 508  $\Omega$  (äquivalent zu  $1\sigma$  der Normalverteilung). Normiert auf den Mittelwert, entspricht das 10%. Aus der s-Karte in Abbildung 5.2-2a kann die durchschnittliche  $R_{Sbi}$ -Streuung über den Wafer bestimmt werden. Sie beträgt 513  $\Omega$  bzw. 10%.

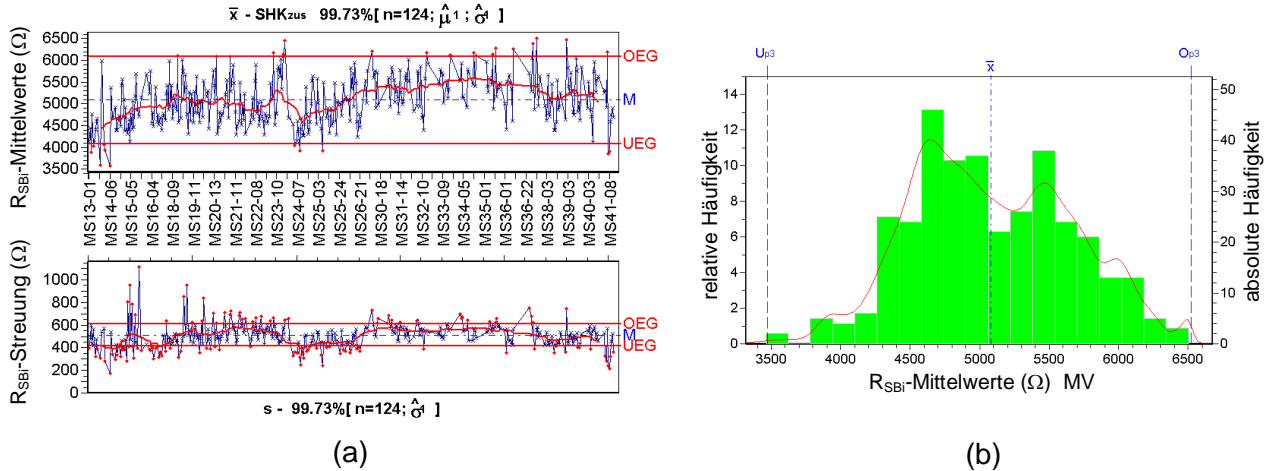


Abbildung 5.2-2:  $R_{SBI}$ - $\bar{x}$ -s-Regelkarte des mittels LPCVD-Epitaxie hergestellten HBT1 (a) und Häufigkeitsverteilung der  $R_{SBI}$ -Mittelwerte mit Verteilungsfunktion (b)

### HBT2 mit LPCVD- und RPCVD-Epitaxie

Im folgenden vergleichen wir das LPCVD- und das RPCVD-Epitaxieverfahren anhand der  $R_{SBI}$ -Werte des HBT2a und des HBT2b.

Die  $R_{SBI}$ -Einzelwertverläufe mit den entsprechenden Häufigkeitsverteilungen sind in Abbildung 5.2-3 dargestellt.

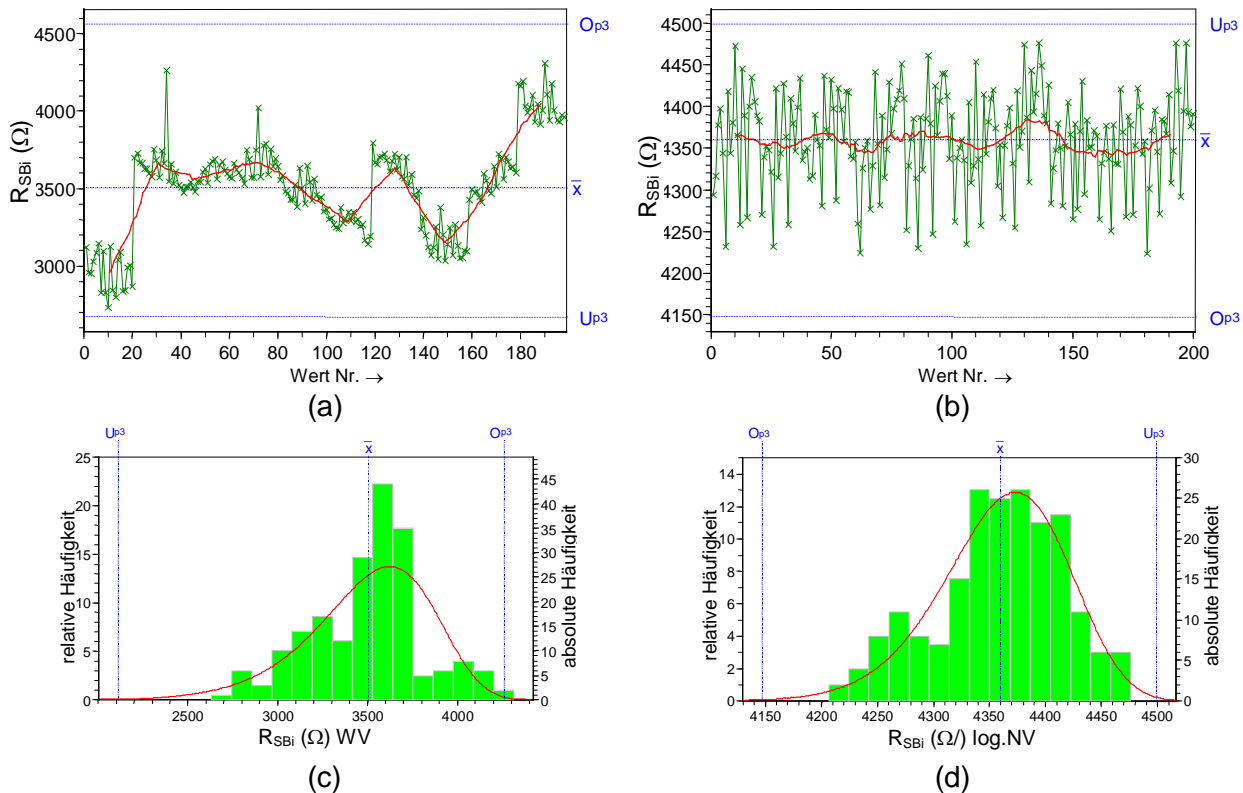


Abbildung 5.2-3:  $R_{SBI}$ -Verlauf (a) und  $R_{SBI}$ -Histogramm (c) des LPCVD-basierten HBT2a sowie  $R_{SBI}$ -Verlauf (b) und  $R_{SBI}$ -Histogramm (d) des RPCVD-basierten HBT2b

Im Fall des LPCVD-basierten HBT2a sind Sprünge im gleitenden  $R_{SBI}$ -Mittelwertverlauf zu erkennen. Die entsprechende Häufigkeitsverteilung wird mit einer Weibulverteilungsfunktion beschrieben (Abbildung 5.2-3c), die einen  $R_{SBI}$ -Mittelwert von 3504  $\Omega$  und eine äquivalente

$1\sigma$ -Streuung von  $314 \Omega$  bzw. 9% hat. Für den RPCVD-basierten HBT2b beträgt der  $R_{\text{SBI}}$ -Mittelwert  $4359 \Omega$  und die äquivalente  $1\sigma$ -Streuung  $70 \Omega$  bzw. 2%. Damit ist die  $R_{\text{SBI}}$ -Streuung des RPCVD-basierten HBTs signifikant kleiner als die des LPCVD-basierten. Zur Bestimmung der  $R_{\text{SBI}}$ -Wafer-zu-Wafer-Streuungen und der  $R_{\text{SBI}}$ -Streuungen über den Wafer sind in Abbildung 5.2-4 die  $\bar{x}$ -s-Verläufe von  $R_{\text{SBI}}$  des HBT2a und des HBT2b dargestellt.

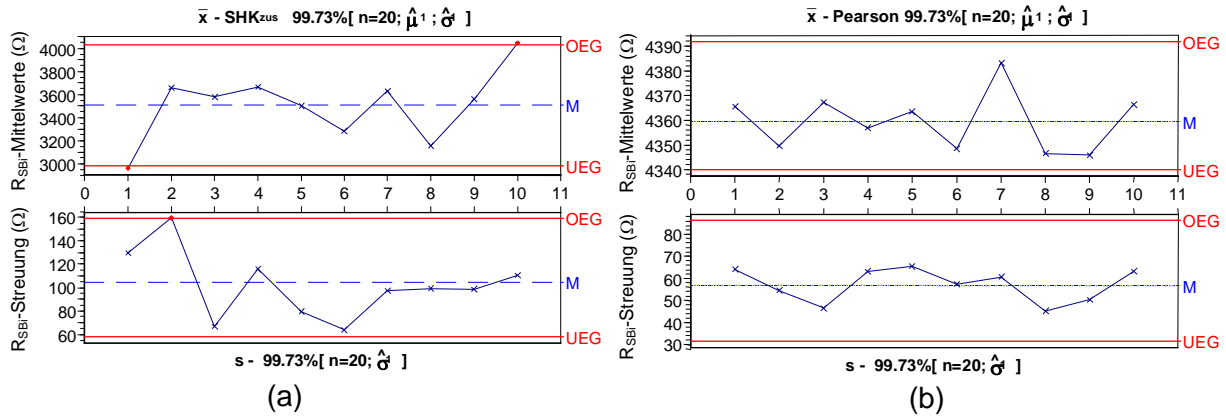


Abbildung 5.2-4:  $R_{\text{SBI}}$  -  $\bar{x}$ -s-Regelkarten des LPCVD-basierten HBT2a (a) und des RPCVD-basierten HBT2b (b)

Der arithmetische  $R_{\text{SBI}}$ -Mittelwert des HBT2a beträgt  $3504 \Omega$  und die  $R_{\text{SBI}}$ -Wafer-zu-Wafer-Streuung ist  $234 \Omega$  bzw. 6,7%. Aus dem  $R_{\text{SBI}}$ -Streuwerteverlauf in Abbildung 5.2-4a resultiert eine durchschnittliche  $R_{\text{SBI}}$ -Streuung über den Wafer von  $104 \Omega$  bzw. 3%. Für den HBT2b ergibt sich ein durchschnittlicher  $R_{\text{SBI}}$ -Mittelwert von  $4359 \Omega$ , eine  $R_{\text{SBI}}$ -Wafer-zu-Wafer-Streuung von  $12,4 \Omega$  (0,3%) sowie eine  $R_{\text{SBI}}$ -Streuung über den Wafer von  $57 \Omega$  (1,3%). Damit sind die  $R_{\text{SBI}}$ -Reproduzierbarkeit und die  $R_{\text{SBI}}$ -Homogenität des RPCVD-basierten HBT2b deutlich besser als für den LPCVD-basierten HBT2a. Im Fall des LPCVD-Verfahrens wird die  $R_{\text{SBI}}$ -Streuung aller Werte hauptsächlich durch die Wafer-zu-Wafer-Streuung dominiert, während im Fall des RPCVD-Verfahrens die  $R_{\text{SBI}}$ -Streuung aller Werte vor allem von der  $R_{\text{SBI}}$ -Streuung über den Wafer beeinflusst wird.

Sowohl die  $R_{\text{SBI}}$ -Reproduzierbarkeit als auch die  $R_{\text{SBI}}$ -Homogenität des LPCVD- und des RPCVD-basierten HBT2 sind besser als die entsprechenden Werte von UHVCVD-basierten Referenz-HBTs ( $1\sigma_{\text{Wafer-zu-Wafer}} = 13\%$ ;  $1\sigma_{\text{über den Wafer}} = 8\%$ ; [2]).

### HBT3 mit RPCVD-Epitaxie

Im folgenden werden statistische Kenngrößen von  $R_{\text{SBI}}$  für eine Stichprobenanzahl von 24 Wafern untersucht, um die Stabilität der Bordotierung des RPCVD-Epitaxieverfahrens für das HBT3-Profil zu beurteilen. Besonderheiten dieses Profils sind die sehr hohe Basis-Bordosis von ca.  $1,3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  und der Einbau von 0,2% Kohlenstoff zur Verringerung der Borausdiffusion.

In Abbildung 5.2-5a ist der  $R_{\text{SBI}}$ -Einzelwertverlauf aller Stichproben und die korrespondierende Häufigkeitsverteilung dargestellt. Der  $R_{\text{SBI}}$ -Mittelwert der Grundgesamtheit ist mit  $1415 \Omega$  um ca. einen Faktor drei kleiner als der des HBT1. Die  $1\sigma$ -äquivalente  $R_{\text{SBI}}$ -Streuung liegt mit  $44 \Omega$  bei 3%. Dies zeigt, daß das Borprofil in der HBT-Basis mit dem RPCVD-Epitaxieverfahren mit sehr guter Homogenität und Reproduzierbarkeit eingestellt wird.

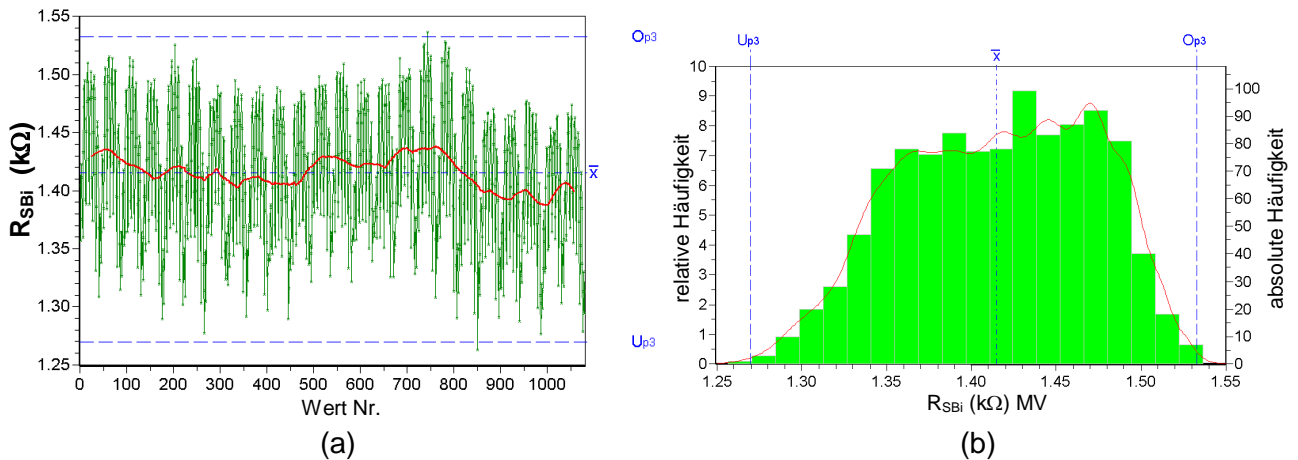


Abbildung 5.2-5:  $R_{SBI}$ -Einzelwertverlauf des RPCVD-basierten HBT3 (a) und  $R_{SBI}$ -Häufigkeitsverteilung mit Mischverteilungsfunktion (b)

Zur Bestimmung der durchschnittlichen Wafer-zu-Wafer-Streuung und der Streuung über den Wafer ist in Abbildung 5.2-6 die  $R_{SBI}$ - $\bar{x}$ -s-Regelkarte dargestellt. Im  $R_{SBI}$ -Mittelwerteverlauf ist nur ein geringfügiger Abfall der letzten vier Wafer zu verzeichnen. Es treten keine Verletzungen der Eingriffsgrenzen auf, so daß  $R_{SBI}$  aus Sicht der statistischen Prozeßbeurteilung stabil ist.

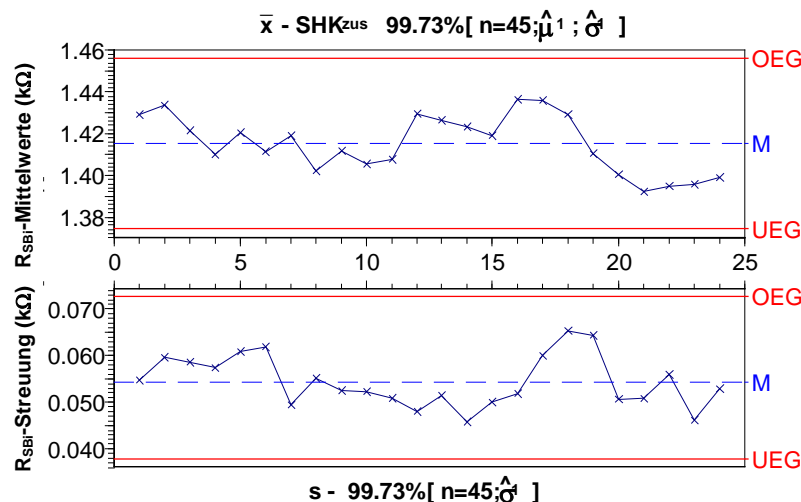


Abbildung 5.2-6:  $R_{SBI}$ - $\bar{x}$ -s-Regelkarte des RPCVD-basierten HBT3

Aus dem Verlauf der  $R_{SBI}$ -Mittelwerte ergibt sich eine durchschnittliche Wafer-zu-Wafer-Streuung von  $14 \Omega$  (1%). Die durchschnittliche  $1\sigma$ -äquivalente  $R_{SBI}$ -Streuung über den Wafer beträgt  $55 \Omega$ . Normiert auf den Mittelwert der Grundgesamtheit entspricht das 3,8%.

In Tabelle 5.2-1 sind die Ergebnisse der statistischen Bewertung von  $R_{SBI}$  für die drei HBTs und für den UHVCVD-Referenz-HBT zusammengefaßt. Für den HBT1 sind die  $R_{SBI}$ -Streuungen von Wafer zu Wafer und über den Wafer im Vergleich zu den Referenzdaten sehr ähnlich. Daraus folgt, daß mit dem LPCVD-Verfahren das Borprofil mit vergleichbarer Homogenität und Reproduzierbarkeit wie im Fall des Referenz-UHVCVD-Verfahrens einstellbar ist. Der unmittelbare Vergleich des LPCVD- und des RPCVD-Epitaxieverfahrens am HBT2a und HBT2b ergibt deutlich geringere  $R_{SBI}$ -Streuungen für das RPCVD-Verfahren. Beim LPCVD-basierten HBT2a dominiert die  $R_{SBI}$ -Wafer-zu-Wafer-Streuung, während beim RPCVD-basierten HBT2b die  $R_{SBI}$ -Streuung über den Wafer 1% zu 0,3% größer als die Wafer-zu-Wafer-Streuung ist. Die Ergebnisse des HBT3 mit einer höheren Bordosis und dem

Einbau von Kohlenstoff bestätigen, daß mittels RPCVD B-Profile mit hoher Reproduzierbarkeit und sehr guter Waferhomogenität abgeschieden werden können.

Die  $R_{SBI}$ -Streuungen von Wafer zu Wafer und über den Wafer sind für RPCVD-basierte HBTs deutlich besser als für UHVCVD-basierte und LPCVD-basierte HBTs.

Tabelle 5.2-1:  $R_{SBI}$ -Mittelwerte und -Streuungen des HBT1, HBT2, HBT3 und des IBM-HBTs [2]

| $R_{SBI}$ ( $\Omega$ ) | LPCVD      |                |            |                | RPCVD      |                |            |                | UHVCVD     |                |
|------------------------|------------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|
|                        | HBT1       |                | HBT2a      |                | HBT2b      |                | HBT3       |                | IBM-HBT    |                |
|                        | Mittelwert | 1 $\sigma$ (%) | Mittelwert | 1 $\sigma$ (%) | Mittelwert | 1 $\sigma$ (%) | Mittelwert | 1 $\sigma$ (%) | Mittelwert | 1 $\sigma$ (%) |
| alle Werte             | 5087       | 15             | 3504       | 9              | 4359       | 2              | 1415       | 3              | 9000       | *)             |
| Wafer zu Wafer         |            | 10             |            | 7              |            | 0,3            |            | 1              |            | 13             |
| über den Wafer         |            | 10             |            | 3              |            | 1              |            | 4              |            | 8              |

\*) keine Angabe

### 5.2.2 Kritische Einflußfaktoren auf die ermittelten $R_{SBI}$ -Streuungen

Im folgenden wird der Einfluß der Epitaxiebedingungen auf die ermittelten  $R_{SBI}$ -Streuungen näher untersucht. Dazu wird die Streuung des Schichtwiderstandes  $R_s$  der in Abschnitt 3.2 beschriebenen SiGe-Modellstrukturen betrachtet. Diese Strukturen bieten den Vorteil, daß  $R_s$  direkt nach der Epitaxie gemessen werden kann. Dadurch läßt sich Homogenität und Reproduzierbarkeit der Bordotierung von SiGe-Schichten ohne Einfluß von Prozeßschritten, die der Epitaxie folgen, bewerten.

Im ersten Teil dieses Abschnitts werden  $R_s$ -Streuungen von Wafer zu Wafer und über den Wafer von LPCVD- und RPCVD-basierten Modellstrukturen ermittelt und mit den entsprechenden  $R_{SBI}$ -Streuungen von HBTs verglichen. Im zweiten Teil wird der Einfluß der Gasströmung auf die Abscheidung im LPCVD-Reaktor untersucht. Im dritten Teil ist der Einfluß der Gasgeschwindigkeit auf die Homogenität des spezifischen Schichtwiderstandes von Bordotierten SiGe-Schichten Gegenstand der Betrachtung.

#### Vergleich der Homogenität und Reproduzierbarkeit von $R_{SBI}$ und $R_s$

In Abbildung 5.2-7 sind die Verläufe der  $R_s$ -Mittelwerte und  $R_s$ -Streuungen der LPCVD-basierten Modellstruktur dargestellt. Der durchschnittliche  $R_s$ -Wafer-zu-Wafer-Mittelwert ist

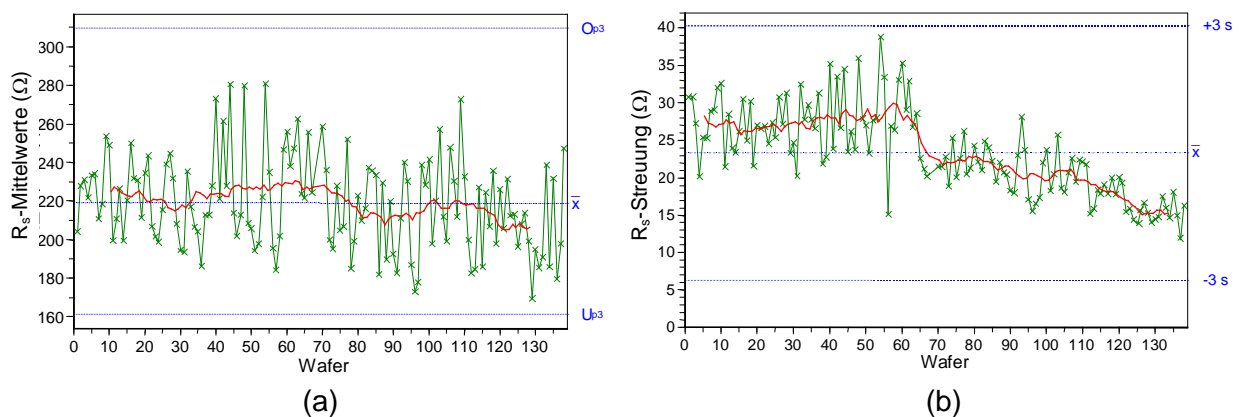


Abbildung 5.2-7: Verlauf der  $R_s$ -Wafer-zu-Wafer-Mittelwerte (a) und der  $R_s$ -Streuungen über den Wafer (b) der LPCVD-basierten SiGe-Modellstruktur

216  $\Omega$  und die  $R_s$ -Wafer-zu-Wafer-Streuung 25  $\Omega$  bzw. 12%. Die durchschnittliche  $R_s$ -Streuung über den Wafer beträgt 23  $\Omega$  bzw. 10%.

Für die RPCVD-Modellstruktur resultiert aus dem Mittelwertverlauf ein durchschnittlicher  $R_s$ -Mittelwert von 132,5  $\Omega$  und eine  $R_s$ -Wafer-zu-Wafer-Streuung von 4,6  $\Omega$  bzw. 3,5% (Abbil-

dung 5.2-8a). Die durchschnittliche  $R_s$ -Streuung über den Wafer beträgt  $2,5 \Omega$  bzw. 2% (Abbildung 5.2-8b) .

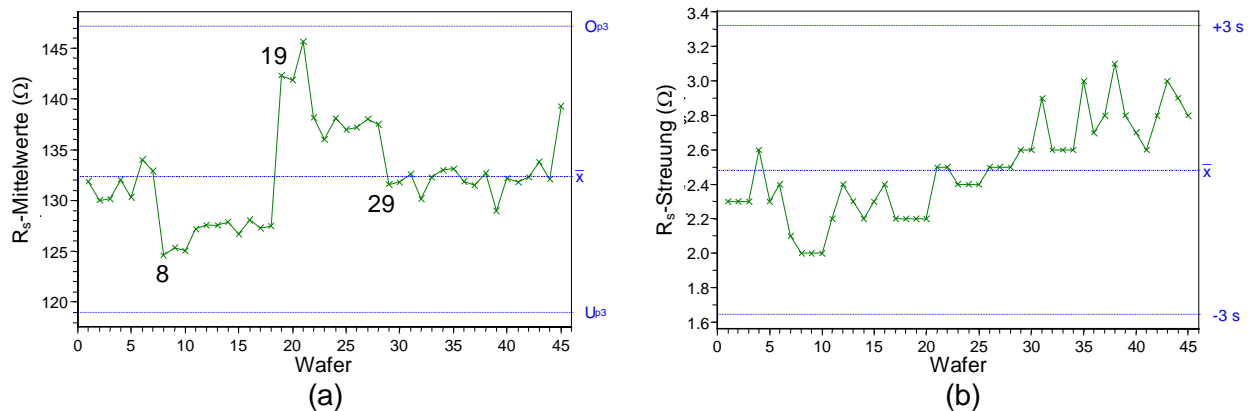


Abbildung 5.2-8: Verlauf der  $R_s$ -Wafer-zu-Wafer-Mittelwerte (a) und der  $R_s$ -Streuungen über den Wafer (b) der RPCVD-basierten SiGe-Modellstruktur

Die statistischen  $R_s$ -Kennwerte der Modellstrukturen sind den  $R_{SBI}$ -Kennwerten von HBTs in der nachfolgenden Tabelle 5.2-2 gegenübergestellt.

Tabelle 5.2-2:  $R_s$ -Mittelwerte und -Streuungen der SiGe-Modellstrukturen und  $R_{SBI}$ -Mittelwerte und -Streuungen von HBT1 und HBT3

|                | LPCVD-Epitaxie        |           |           |                  |           |           | RPCVD-Epitaxie         |           |            |                  |           |           |
|----------------|-----------------------|-----------|-----------|------------------|-----------|-----------|------------------------|-----------|------------|------------------|-----------|-----------|
|                | $R_s$ -Modellstruktur |           |           | $R_{SBI}$ - HBT1 |           |           | $R_s$ - Modellstruktur |           |            | $R_{SBI}$ - HBT3 |           |           |
|                | Mittelwert            | $1\sigma$ | $1\sigma$ | Mittelwert       | $1\sigma$ | $1\sigma$ | Mittelwert             | $1\sigma$ | $1\sigma$  | Mittelwert       | $1\sigma$ | $1\sigma$ |
|                | $\Omega$              | $\Omega$  | %         | $\Omega$         | $\Omega$  | %         | $\Omega$               | $\Omega$  | %          | $\Omega$         | $\Omega$  | %         |
| Wafer zu Wafer | 216                   | 25        | <b>11</b> | 5087             | 587       | <b>10</b> | 132,5                  | 4,6       | <b>3,5</b> | 1415             | 14        | <b>1</b>  |
| über den Wafer | 216                   | 22,7      | <b>10</b> | 5087             | 510       | <b>10</b> | 132,5                  | 2,5       | <b>2</b>   | 1415             | 54        | <b>4</b>  |

Sowohl für LPCVD- als auch für RPCVD-Epitaxie sind die Unterschiede zwischen den prozentualen Streuungen der  $R_s$ - und der  $R_{SBI}$ -Werte gering. Das zeigt, daß die Homogenität und die Reproduzierbarkeit der Einstellung des finalen Borprofils im HBT unter unseren Prozeßbedingungen im wesentlichen von der Beherrschung des genutzten Epitaxieprozesses abhängt. Insbesondere für das LPCVD-Verfahren wird deutlich, daß die Streuung der  $R_{SBI}$ -Werte sogar ausschließlich von Einflüssen des Epitaxieprozesses abhängt.

Die Ergebnisse in Tabelle 5.2-2 belegen auch, daß mittels RPCVD-Epitaxie eine deutlich bessere Reproduzierbarkeit und Homogenität der Bordotierung von SiGe erreicht wurde. Die größeren Wafer-zu-Wafer-Streuungen LPCVD-basierter  $R_{SBI}$ -Meßwerte resultieren aus häufig auftretenden großen Streuungen aufeinanderfolgender Wafer. Dieses Verhalten ist sowohl für  $R_{SBI}$  (Abbildung 5.2-2) als auch für  $R_s$  (Abbildung 5.2-7a) zu beobachten. Hauptsächlich können zwei Einflußfaktoren dieses Verhalten hervorrufen: Erstens kann eine große Wafer-zu-Wafer-Streuung der SiGe-Schichtdicke zu entsprechenden  $R_s$ -Streuungen führen. Zweitens können Schwankungen des  $B_2H_6/SiH_4/GeH_4$ -Verhältnisses  $R_s$ -Streuungen bewirken. Zur Bestimmung des Einflusses der  $d_{SiGe}$ -Wafer-zu-Wafer-Streuung sind die  $d_{SiGe}$ -Verläufe der SiGe-Modellstrukturen beider Epitaxieverfahren in Abbildung 5.2-9 dargestellt. Der  $d_{SiGe}$ -Mittelwert des LPCVD-Verfahrens (Abbildung 5.2-9a) beträgt 101,3nm und die  $1\sigma$ - $d_{SiGe}$ -Wafer-zu-Wafer-Streuung 4,4nm bzw. 4,3%. Damit unterscheiden sich die Wafer-zu-Wafer-Streuungen von  $d_{SiGe}$  und  $R_s$  um einen Faktor 2,5, so daß Schichtdickenstreuungen nicht als einziger Einflußfaktor für  $R_s$ -Streuungen anzusehen sind.

Der  $d_{SiGe}$ -Mittelwert der Modellstruktur des RPCVD-Verfahrens ist 98,6nm und die  $1\sigma$ - $d_{SiGe}$ -Wafer-zu-Wafer-Streuung beträgt 2,1nm bzw. 2,2%. Die  $d_{SiGe}$ - und die  $R_s$ -Wafer-zu-Wafer-Streuungen unterscheiden sich um einen Faktor von 1,6, so daß der Einfluß von Schicht-



dickenstreuungen auf  $R_S$ -Streuungen bei der RPCVD-Modellstruktur größer der der LPCVD-Modellstruktur ist.

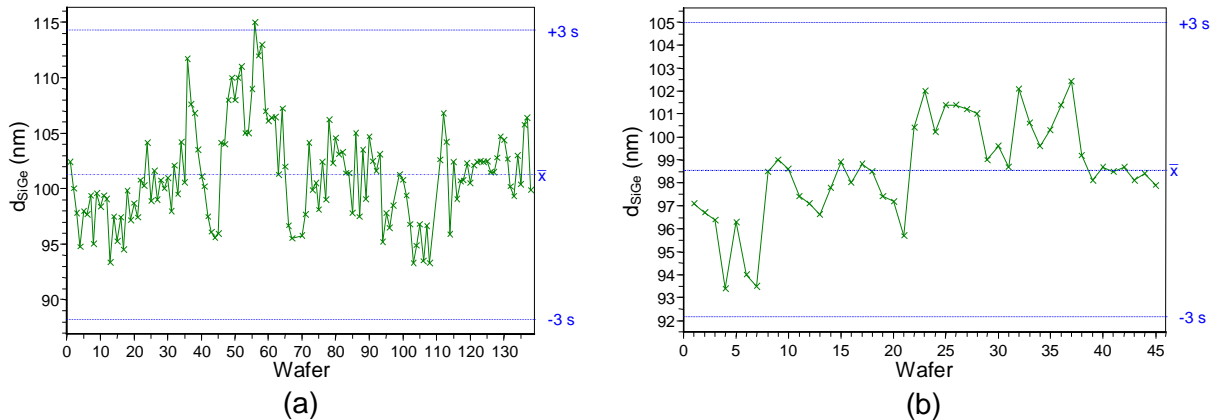


Abbildung 5.2-9:  $d_{SiGe}$ -Verlauf der SiGe-Modellstrukturen für LPCVD- (a) und RPCVD-Prozeßbedingungen (b)

Die  $d_{SiGe}$ -Streuungen der Modellstrukturen lassen sich unter Anwendung der Abhängigkeiten aus Kapitel 4 und unter der Voraussetzung, daß alle anderen Einflußgrößen vernachlässigt werden können, in Temperaturstreuungen der Abscheidungen umrechnen. Für die LPCVD-Modellstruktur ergibt sich für eine  $6\sigma$ - $d_{SiGe}$ -Streuung von 26,4nm eine Temperaturstreuung von 11°C, während eine  $6\sigma$ - $d_{SiGe}$ -Streuung von 12,6nm der RPCVD-Modellstruktur einer Temperaturstreuung von 6,4°C entspricht. Demnach kann die bessere Wafer-zu-Wafer-Reproduzierbarkeit der RPCVD-Modellstruktur mit einer besseren Temperaturreproduzierbarkeit erklärt werden.

Im folgenden wird der Einfluß von Schwankungen des  $B_2H_6/SiH_4/GeH_4$ -Verhältnisses am Beispiel des RPCVD-Verfahrens diskutiert. Der Boreinbau in SiGe-Schichten wird durch das  $B_2H_6/SiH_4/GeH_4$ -Verhältnis bestimmt (Kapitel 4). Zwischen der Borkonzentration in der SiGe-Schicht und dem  $B_2H_6/SiH_4$ -Verhältnis in der Gasphase besteht eine lineare Abhängigkeit. Aufgrund dieser Abhängigkeit lassen sich die Sprünge im  $R_S$ -Mittelwertverlauf ab Wafer 8, 19 und 29 in Abbildung 5.2-8a verstehen. Diese korrelieren mit dem Wechsel der Diborangasflasche. In ihr ist das Dotiergas mit Wasserstoff verdünnt, so daß unterschiedliche  $B_2H_6/H_2$ -Verhältnisse der jeweiligen Gasflaschen auch Änderungen im  $B_2H_6/SiH_4/GeH_4$ -Verhältnis bewirken. Diese beeinflussen den Boreinbau, der zu den beobachteten  $R_S$ -Änderungen führt. So stimmt der Quotient der Widerstände von Wafer 21 zu Wafer 11 exakt mit dem Quotienten der  $B_2H_6/H_2$ -Verhältnisse der verwendeten Gasflaschen überein. In ähnlicher Art und Weise wirken sich Schwankungen im German-Wasserstoffverhältnis für unterschiedliche Germanflaschen aus. Der leichte  $R_S$ -Anstieg ab Wafer 11 bzw. der  $R_S$ -Abfall ab Wafer 22 wird durch unterschiedliche German/Wasserstoff-Verhältnisse hervorgerufen. Bei der RPCVD-basierten Modellschicht wurden die auftretenden Schwankungen bewußt nicht über Korrekturen des Verhältnisses der Prozeßgase kompensiert, um auftretende Driften von Prozeßparametern zu erkennen. Nachregelungen der Gasflüsse erfolgten nur bei den HBT-Profilabscheidungen, woraus sich die kleinere  $R_{SBI}$ -Wafer-zu-Wafer-Streuung gegenüber der  $R_S$ -Wafer-zu-Wafer-Streuung der Modellstruktur erklären läßt (Tabelle 5.2-2).

### **Einfluß der Gasströmung auf die Abscheidung im LPCVD-Reaktor**

Im folgenden werden Ursachen der im Vergleich zur RPCVD-Abscheidung höheren  $R_S$ -Streuungen über den Wafer bei LPCVD-Abscheidung untersucht. Dazu werden die Gasströmungsverhältnisse des LPCVD-Reaktors analysiert, die in Abbildung 5.2-10 skizziert sind. Die Prozeßgase gelangen vom Gassystem über insgesamt drei Zuleitungen in den Raum zwischen Quarzfenster und Showerhead, wobei das Diboran über zwei separate Zuleitungen eingespeist wird. Das Gasgemisch tritt anschließend senkrecht aus dem Showerhead aus. Auf der Waferoberfläche vollzieht sich die Schichtabscheidung durch temperatur-

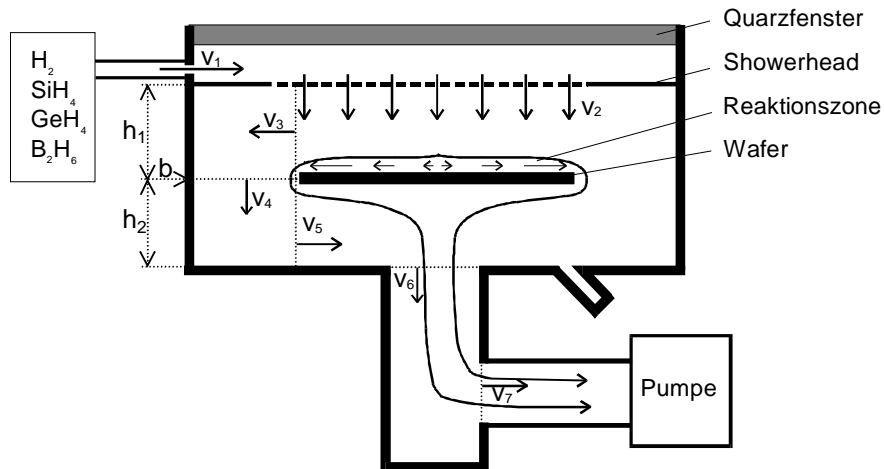


Abbildung 5.2-10: Gasströmung im LPCVD-Reaktor

aktivierte chemische Reaktionen der auftreffenden Gase. Die Reaktionsprodukte und die nicht umgesetzten Prozeßgase werden um den Wafer geführt und abgepumpt.

Zur Analyse der Strömungsverhältnisse werden nun die in Abbildung 5.2-10 dargestellten Gasgeschwindigkeiten  $v_1$ ,  $v_2$ ,  $v_3$ ,  $v_4$ ,  $v_5$ ,  $v_6$  und  $v_7$  abgeschätzt.

Die Gasgeschwindigkeit  $v$  wird mit folgender Beziehung beschrieben:

$$v = \frac{V}{t \cdot A} \quad (5.2-2)$$

Hierbei ist  $A$  das Flächenelement, das vom Gasvolumen  $V$  in der Zeit  $t$  durchströmt wird. Das Volumen kann nach der idealen Gasgleichung

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T \quad (5.2-3)$$

berechnet werden. Hierbei sind  $p$  der Druck,  $m$  die Stoffmenge,  $R$  die Gaskonstante und  $T$  die Temperatur. Die Verwendung der idealen Gasgleichung ist gerechtfertigt, weil Wasserstoff als Hauptbestandteil der Reaktionsgase hinreichend gut mit dieser Gleichung beschrieben wird. Da sich die Zustandsgrößen  $p$ ,  $V$  und  $T$  im Gasversorgungssystem und im Reaktor unterscheiden, ergibt sich aus Gleichung 5.2-3 unter der Voraussetzung, daß  $m \cdot R$  konstant ist, folgende Beziehung:

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2} \quad (5.2-4)$$

Die Größen mit dem Index 1 kennzeichnen die Zustandsgrößen im Reaktor ( $p_1=200\text{Pa}$ ) und der Index 2 beschreibt die Zustandsgrößen im Gasversorgungssystem ( $p_2=10^5\text{Pa}$ ;  $T_2=23^\circ\text{C}$ ). Die Temperatur im Reaktor beträgt am Gaseinlaß  $23^\circ\text{C}$  und in der Reaktionszone liegt die Temperatur in der Größenordnung der Wafertemperatur ( $500^\circ\text{C}$  für SiGe-Epitaxie). Zur Vereinfachung wird die Reaktortemperatur  $T_1$  auf  $23^\circ\text{C}$  gesetzt, so daß sich Gleichung 5.2-4 auf  $p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$  reduziert. Aus den Gleichungen 5.2-2 und 5.2-4 ergibt sich folgende Beziehung für die Gasgeschwindigkeit:

$$v = \frac{p_2 \cdot V_2}{t \cdot A \cdot p_1} \quad (5.2-5)$$

Unter der Annahme, daß das Gasvolumen pro Zeit (1,8 Liter pro Minute; siehe Abschnitt 3.2) für alle Geschwindigkeiten gleich ist, wurden die Gasgeschwindigkeiten  $v_1$  bis  $v_7$  für eine konstante Gastemperatur von  $23^\circ\text{C}$  ermittelt und in Tabelle 5.2-3 aufgelistet.



Tabelle 5.2-3 Ermittelte Gasgeschwindigkeiten für einen konstanten Gasfluß von 1,8 Litern Wasserstoff pro Minute für  $T=23^{\circ}\text{C}$  ( $r$ -Radius;  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $b$  siehe Abbildung 5.2-10)

| i | Dimension<br>(mm) | A<br>( $\text{mm}^2$ ) | $v_i$<br>(m/s) |
|---|-------------------|------------------------|----------------|
| 1 | $r = 3 \times 2$  | $3 \times 12,6$        | 397            |
| 2 | $r = 0,25$        | 0,2                    | 300            |
| 3 | $h_1 = 30$        | 9424                   | 1,6            |
| 4 | $b = 50$          | 2350                   | 6,4            |
| 5 | $h_2 = 75$        | 23561                  | 0,6            |
| 6 | $r = 50$          | 7853                   | 1,9            |
| 7 | $r = 50$          | 7853                   | 1,9            |

Beim Eintritt der Reaktionsgase in den Reaktor stellt sich eine Gasgeschwindigkeit  $v_1$  von 397 m/s pro Zuleitung ein. Das hat den Vorteil, daß die Gase aus der Hauptzuleitung und der separaten Diboranzuführung im Raum zwischen Quarzfenster und Showerhead gut durchmischt werden. Dieses Gasgemisch tritt dann durch jedes der 250 Löcher des Showerheads mit der Geschwindigkeit  $v_2$  von 300 m/s aus. Im weiteren Verlauf verringert sich die Gasgeschwindigkeit deutlich auf 1,6m/s ( $v_3$ ), steigt auf 6,4m/s ( $v_4$ ) an, um dann wiederum auf ein Zehntel ( $v_5$ ) abzufallen. Schließlich steigt die Gasgeschwindigkeit auf 1,9m/s ( $v_6$  und  $v_7$ ) an. Natürlich ist eine genaue Simulation der Gasströmungsverhältnisse wesentlich komplexer, weil dabei die Temperaturverhältnisse in der Reaktionszone, die Abkühlung der Gase für die Komponenten  $v_5$ ,  $v_6$  und  $v_7$  mit berechnet werden müssen. Aber schon aus der erfolgten einfachen Abschätzung der Geschwindigkeiten ergeben sich folgende Erkenntnisse:

Die unterschiedlichen Gasgeschwindigkeiten  $v_3$  bis  $v_6$  führen zu unerwünschten Turbulenzen. Daraus können nichtstationäre Gaspartialdrücke und Temperaturen besonders am Waferrand resultieren, die die Homogenität und Reproduzierbarkeit des Schichtwachstums und der Bordotierung negativ beeinflussen. Die Gasgeschwindigkeiten in Tabelle 5.2-3 belegen, daß die geometrischen Verhältnisse des LPCVD-Reaktors vom Hersteller nicht optimal gewählt sind.

#### ***Einfluß der Gasgeschwindigkeit auf die Homogenität des spezifischen Schichtwiderstandes von B-dotierten SiGe-Schichten***

Der Einfluß der Geschwindigkeit des Wasserstoffträrgases auf die Homogenität des Boreinbaus in SiGe-Schichten wird nun am Beispiel zweier LPCVD-basierter Modellstrukturen bestimmt. Die erste entspricht der in Abschnitt 3.2 beschriebenen LPCVD-SiGe-Modellstruktur, wobei die Schichtdicke auf 50nm reduziert wurde. Bei der zweiten Modellstruktur wurden im Vergleich zur ersten der Gesamtdruck und die Wasserstoffflußmenge um den Faktor 10 erhöht. Damit ist der Wasserstoffpartialdruck um ca. einen Faktor 10 größer als im Standardfall, während alle anderen Gaspartialdrücke sowie die German- bzw. Diboran-Silan-Verhältnisse konstant blieben. Der höhere Wasserstoffpartialdruck hat höhere Gasgeschwindigkeiten im Epitaxiereaktor zur Folge. Dadurch wird die Wafertemperatur am Rand reduziert, was zu einer kleineren Abscheiderate und damit zu einem erhöhten Schichtwiderstand führt. Um dennoch Aussagen zur Homogenität des Boreinbaus über den Wafer zu gewinnen, wird im folgenden die Verteilung des spezifische Widerstandes  $\rho$  betrachtet. Dieser wird aus dem Schichtwiderstand  $R_s$  und der SiGe-Schichtdicke  $d_{\text{SiGe}}$  ermittelt, die mittels Ellipsometermessung bestimmt wurde.

Die Verteilungen des spezifischen Widerstandes über den Wafer beider Modellstrukturen sind in Abbildung 5.2-11 dargestellt. Im Fall des Standardwasserstoffpartialdrucks ist ein Anstieg von  $\rho$  vom Zentrum zum Scheibenrand zu verzeichnen, d.h. im Zentrum wird mehr Bor eingebaut als am Rand. Die Erhöhung des Wasserstoffpartialdrucks führt zum entgegengesetzten Verhalten. Das Maximum des spezifischen Widerstandes befindet sich nun im Waferzentrum, was darauf hinweist, daß am Waferrand mehr Bor eingebaut wird. Beide Profile illustrieren, daß die Homogenität des Boreinbaus durch einen hohen Wasserstoffpartialdruck deutlich verbesserbar ist. Der erhöhte Wasserstoffpartialdruck führt allerdings zu dem erwähnten Abfall der SiGe-Schichtdicke vom Waferzentrum zum -rand, der durch einen

Temperaturabfall verursacht wird. Für den hier betrachteten LPCVD-Reaktor war eine Kompensation dieses Temperaturabfalls nicht möglich, so daß die Standardbedingungen eingesetzt wurden.

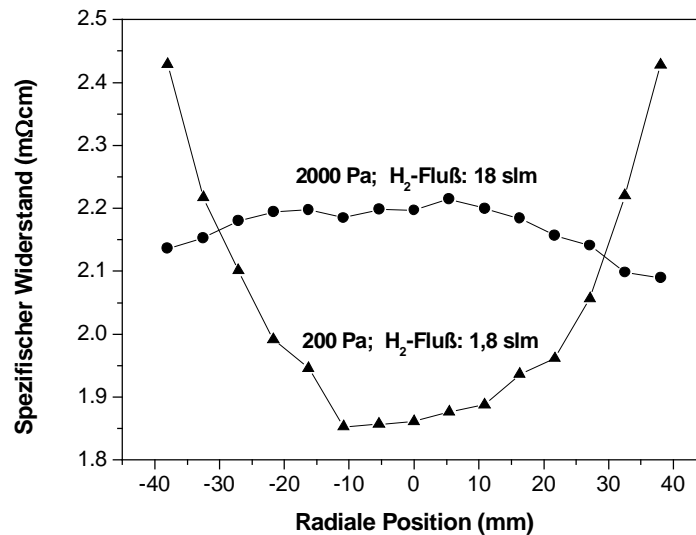


Abbildung 5.2-11: Spezifischer Widerstand über den Wafer für Standardbedingungen ( $p_{\text{ges}}=200\text{Pa}$ ;  $\text{H}_2\text{-Fluß}=1,8\text{slm}$ ;  $p_{\text{H}_2}=188\text{Pa}$ ) und bei erhöhtem Wasserstoffpartialdruck ( $p_{\text{ges}}=2000\text{Pa}$ ;  $\text{H}_2\text{-Fluß}=18\text{slm}$ ;  $p_{\text{H}_2}=1987\text{Pa}$ )

Im Fall der RPCVD-Epitaxie ist die  $R_S$ -Streuung über den Wafer vergleichsweise klein (Tabelle 5.2-2). Dafür sorgt einerseits der hohe Gasfluß des Wasserstoffträrgases. Außerdem werden die Reaktionsgase mit einer konstanten Gasgeschwindigkeit parallel über die Waferoberfläche geführt, so daß sich über den gesamten Wafer konstante Partialdrücke der Prozeßgase einstellen, die zu einem homogenen Boreinbau über den Wafer führen.

#### **Fazit der Bewertung der epitaktischen Bordotierung der SiGe-Schichten anhand $R_{\text{SBI}}$**

RPCVD-basierte HBTs besitzen eine deutlich bessere  $R_{\text{SBI}}$ -Homogenität und -Reproduzierbarkeit als LPCVD- und UHVCVD-basierte HBTs. Die  $R_{\text{SBI}}$ -Homogenität und -Reproduzierbarkeit LPCVD-basierter HBTs ist der UHVCVD-basierter HBTs vergleichbar.

In diesem Abschnitt wurde gezeigt, daß die  $R_{\text{SBI}}$ -Streuungen hauptsächlich vom Epitaxieprozeß herrühren. Als kritische Einflußfaktoren der epitaktischen Abscheidung erwiesen sich Streuungen der SiGe-Schichtdicke, die ihren Ursprung in Temperaturstreuungen haben. Ferner haben die Gasströmung und Gasgeschwindigkeiten, insbesondere im Fall des LPCVD-Epitaxiereaktors, Einfluß auf die Bordotierung von SiGe-Schichten.

### 5.3 Bewertung von B- und Ge-Profilen anhand der Kollektorströme $I_C$

Der Kollektorstrom  $I_C$  ist ein wesentlicher Parameter von Bipolartransistoren. Im Fall von HBTs wird  $I_C$  durch das Ge- und das B-Profil in der Basisregion bestimmt (siehe Gleichungen 2.9 und 2.10). Der Kollektorstrom kann deshalb sehr gut als Parameter zur Bewertung der Reproduzierbarkeit und Homogenität der epitaktischen Abscheidung von B- und Ge-HBT-Profilen benutzt werden.

In Abschnitt 5.3.1 erfolgt die statistische Bewertung des Kollektorstroms des unter Nutzung des LPCVD-Epitaxieverfahrens hergestellten HBT1. Nach Bewertung aller Stichproben werden die  $I_C$ -Wafer-zu-Wafer-Reproduzierbarkeit und  $I_C$ -Homogenität über den Wafer ermittelt. In Abschnitt 5.3.2 erfolgt ein direkter Vergleich des LPCVD- und des RPCVD-Epitaxieverfahrens anhand von  $I_C$ -Mittelwerten und -Streuungen des HBT2a und des HBT2b.

In Abschnitt 5.3.3 wird der Kollektorstrom des mittels RPCVD-Verfahren mit einer Kohlenstoff-dotierten SiGe-Basisregion hergestellten HBT3 statistisch bewertet.

Die Kollektorströme wurden bei einer Temperatur von 27°C, Kollektor-Basis-Spannungen ( $V_{CB}$ ) von 0V (alle HBTs) und Basis-Emitter-Spannungen ( $V_{BE}$ ) von 0,5V (HBT1, HBT3) bzw. 0,7V (HBT2a und HBT2b) gemessen. Die Emitterfläche des HBT1 und des HBT3 betrug jeweils  $(100 \times 100) \mu\text{m}^2$  und die des HBT2(a und b)  $24 \times (1 \times 1) \mu\text{m}^2$ .

#### 5.3.1 $I_C$ -Mittelwerte und -Streuungen für mittels LPCVD hergestellte SiGe-HBTs

Der  $I_C$ -Einzelwertverlauf und die korrespondierende Häufigkeitsverteilung mit der logarithmischen Normalverteilungsfunktion sind in Abbildung 5.3-1 dargestellt. Der resultierende  $I_C$ -Mittelwert aller Stichproben beträgt  $16,6 \mu\text{A}$  mit einer äquivalenten  $1\sigma$ -Streuung von  $5,6 \mu\text{A}$ . Das entspricht einer prozentualen Streuung von 34%.

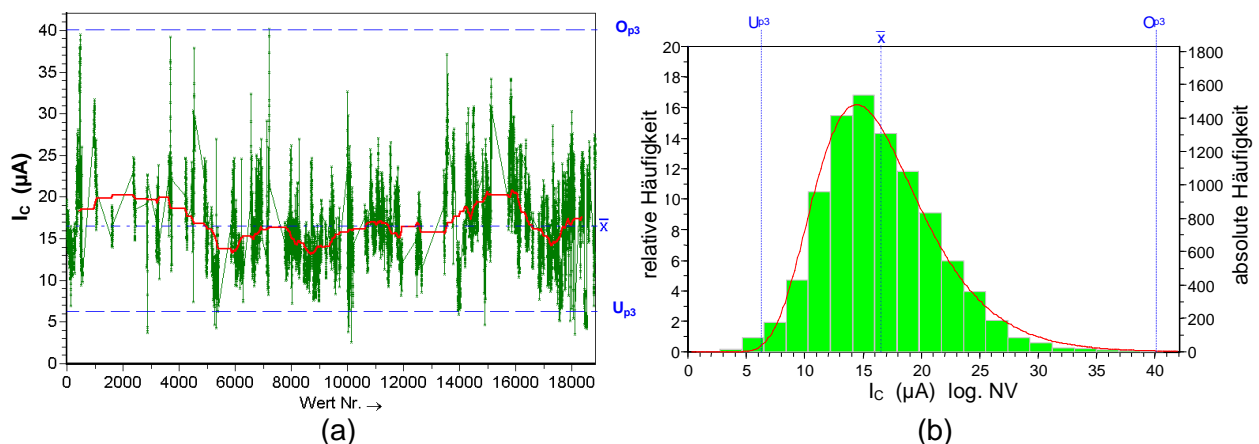


Abbildung 5.3-1:  $I_C$ -Einzelwertverlauf (a) und  $I_C$ -Histogramm (mit logarithmischer Normalverteilungsfunktion) (b) des LPCVD-basierten HBT1

Die Ursachen der hohen  $I_C$ -Streuung werden weiter unten diskutiert. Zunächst wird die Wafer-zu-Wafer-Reproduzierbarkeit des Kollektorstroms und dessen Homogenität über den Wafer näher betrachtet. Dazu ist in Abbildung 5.3-2a der Verlauf der  $I_C$ -Mittelwerte und der  $I_C$ -Streuungen pro Wafer dargestellt. Die  $I_C$ -Mittelwerte streuen in einem Bereich von  $5 \mu\text{A}$  bis  $35 \mu\text{A}$  um den Mittelwert von  $16,6 \mu\text{A}$ . Aus der Verteilung der Mittelwerte in Abbildung 5.3-2b ergibt sich eine  $I_C$ -Wafer-zu-Wafer-Streuung von  $5 \mu\text{A}$  bzw. 30%.

Der arithmetische Mittelwert der  $I_C$ -Streuung über den Wafer liegt mit  $2,2 \mu\text{A}$  bei 13,2% des Mittelwertes (Abbildung 5.3-2a). Sowohl der Verlauf der  $I_C$ -Mittelwerte als auch der der  $I_C$ -Streuungen ist durch große Schwankungen und durch zahlreiche Verletzungen der Eingriffsgrenzen gekennzeichnet.

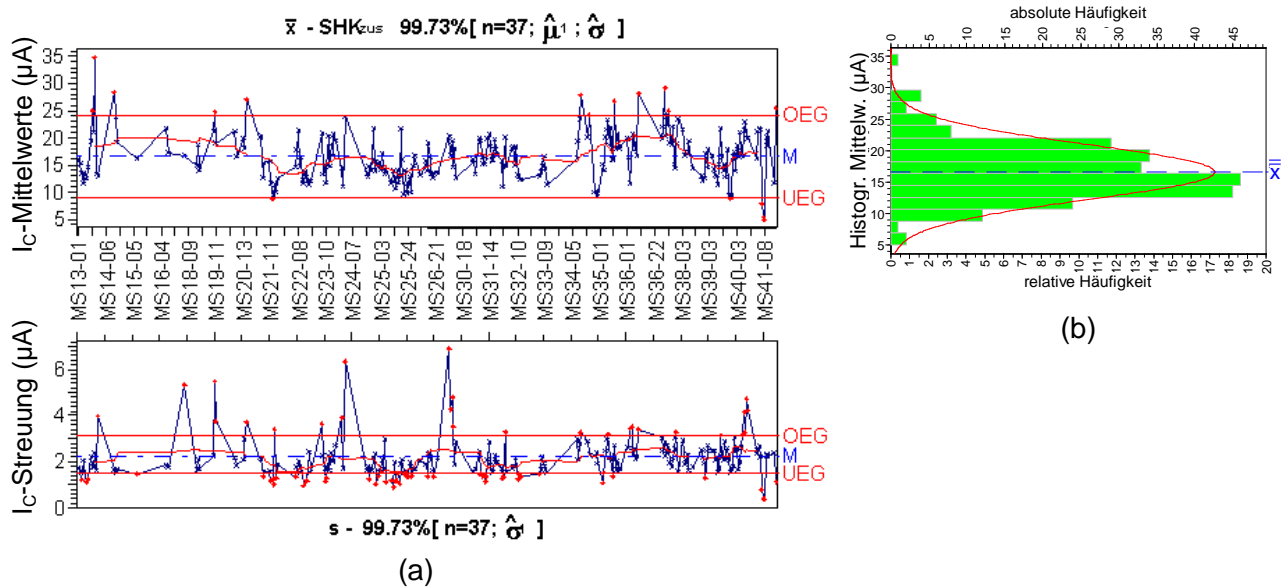


Abbildung 5.3-2:  $\bar{x}$ -s-Regelkarte von  $I_C$  (a) und Histogramm der  $I_C$ -Mittelwerte (mit  $\bar{x}$ -Kennwert) (b) des LPCVD-basierten HBT1

Die Zusammenstellung der Daten in Tabelle 5.3-1 zeigt, daß die  $I_C$ -Streuungen aller Stichproben des HBT1 hauptsächlich durch die Wafer-zu-Wafer-Streuung verursacht werden.

Tabelle 5.3-1: Statistische Kennwerte von  $I_C$  des mittels LPCVD-Epitaxie hergestellten HBT1

|                  | Kollektorstrom $I_C$ |           |           |
|------------------|----------------------|-----------|-----------|
|                  | Mittelwert           | $1\sigma$ | $1\sigma$ |
|                  | μA                   | μA        | %         |
| alle Stichproben | 16,6                 | 5,6       | 34        |
| Wafer zu Wafer   |                      | 5         | 30        |
| über den Wafer   |                      | 2,2       | 13        |

### Einflußfaktoren auf die $I_C$ -Reproduzierbarkeit

Der Kollektorstrom eines HBT wird im wesentlichen durch das Integral über dem ortsabhängigen Quotienten aus  $n_i^2$  (Eigenleitendichte<sup>2</sup>) und  $p$  (Löcherkonzentration) bestimmt (Gleichung 2.10). Somit kommen als potentielle Quellen für die Wafer-zu-Wafer-Streuungen von  $I_C$  vor allem die Wafer-zu-Wafer-Streuungen der Ge- und B-Profile in Frage. Wir betrachten deshalb im folgenden die  $I_C$ -Streuungen in Relation zu den Streuungen von  $R_{\text{SBI}}$ ,  $X_{\text{EB}}$ ,  $d_{\text{SiGe}}$ ,  $x$  und  $d_{\text{Si-Cap}}$ . Wir gehen dabei davon aus, daß die  $R_{\text{SBI}}$ -Streuungen die Streuungen des B-Profiles widerspiegelt, und die  $d_{\text{SiGe}}$ - und die  $x$ -Streuungen die des Ge-Profiles.  $X_{\text{EB}}$ -Streuungen werden einbezogen, weil sie Anhaltspunkte zu Änderungen der Lage des B-Profiles zum Ge-Profil liefern können.

In Abbildung 5.3-3 sind für ein ausgewähltes Chip (Mittelchip) die Verläufe von  $I_C$ ,  $R_{\text{SBI}}$ ,  $X_{\text{EB}}$ ,  $d_{\text{SiGe}}$  und  $x$  dargestellt. Zwischen dem  $I_C$ - und dem  $R_{\text{SBI}}$ -Verlauf ist keine Korrelationen zu erkennen. Hingegen ist sowohl im  $I_C$ - als auch im  $X_{\text{EB}}$ -Verlauf ein Abfall bei den Stichproben 70, 220, 255, 400 (Abbildungen 5.3-3a und c) zu beobachten. Zu erklären ist dieses Verhalten mit einer Verschiebung des Borprofils in Richtung Emitter. Im Resultat ist  $X_{\text{EB}}$  verkleinert, und ein größerer Teil des Bors befindet sich in einem Bereich einer kleinen Eigenleitendichte (Ge-Gradient), woraus ein  $I_C$ -Abfall resultiert.

Die  $d_{\text{SiGe}}$ - und  $x$ -Verläufe in Abbildungen 5.3-3d und e werden nur zur Bestimmung der entsprechenden Wafer-zu-Wafer-Streuung des Ge-Profiles verwendet, weil sie auf einer geringeren Anzahl von Stichproben als  $I_C$ ,  $R_{\text{SBI}}$  und  $X_{\text{EB}}$  basieren.

### 5.3 - Bewertung des B- und des Ge-Profiles anhand $I_C$

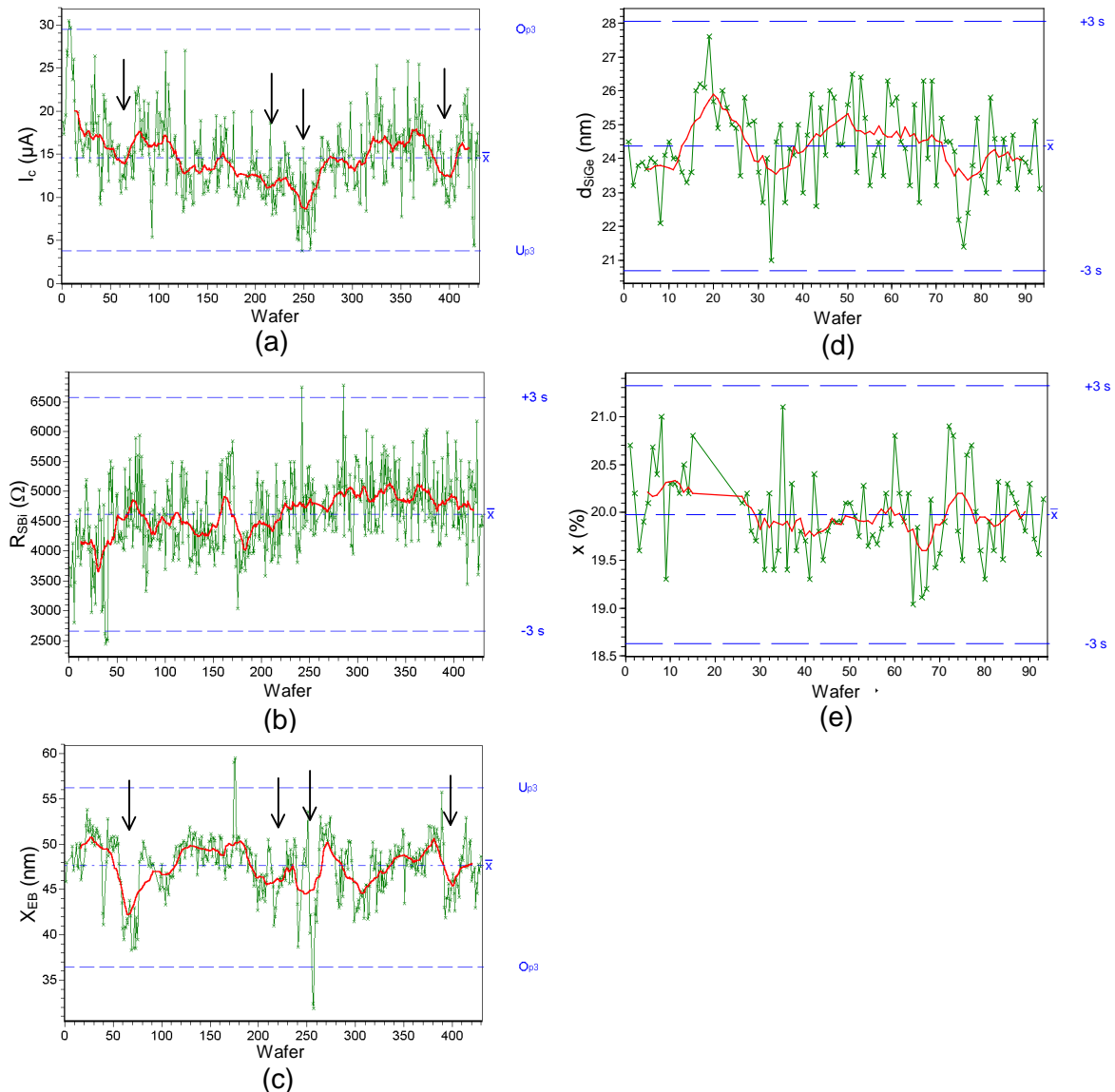


Abbildung 5.3-3:  $I_C$ -(a),  $R_{SBI}$ -(b),  $X_{EB}$ -(c),  $d_{SiGe}$ -(d) und  $x$ -Verlauf (e) des HBT1 eines ausgewählten Chips

In Tabelle 5.3-2 sind die Wafer-zu-Wafer-Mittelwerte und -Streuungen der Parameter des HBT1 aus Abbildung 5.3-3 zusammengefaßt.

Tabelle 5.3-2: Wafer-zu-Wafer-Mittelwerte und -Streuungen der HBT-Parameter aus Abbildung 5.3-3

|                        | Mittelwert | $1\sigma$ | $1\sigma$ (%) |
|------------------------|------------|-----------|---------------|
| $I_C$ ( $\mu A$ )      | 14,4       | 5,6       | <b>38</b>     |
| $R_{SBI}$ ( $\Omega$ ) | 4616       | 652       | 14            |
| $X_{EB}$ (nm)          | 47,7       | 3,3       | 6,8           |
| $x$ (%)                | 20,0       | 0,45      | 2,3           |
| $d_{SiGe}$ (nm)        | 24,4       | 1,2       | 4,9           |

Die Streuung des inneren Basisschichtwiderstandes beträgt 14%. Daraus folgt, daß die  $I_C$ -Streuung nicht einzig und allein durch Streuungen der Bordosis hervorgerufen werden kann. Aus diesem Grund kommen als weitere Ursachen der  $I_C$ -Streuung sowohl Streuungen des Ge-Profiles als auch des Quotienten des B- zum Ge-Profil in Frage. Hinweise auf Lageverschiebung des B- zum Ge-Profil liefern die Korrelationen zwischen  $I_C$  und  $X_{EB}$  (Abbildung 5.3-3 a und c). Die Streuung der maximalen Ge-Konzentration ( $x$ ) zur Beschreibung der Re-

produzierbarkeit des Germaniumprofils bewirkt wegen der exponentiellen Abhängigkeit (Gleichungen 2.12 und 2.5) eine  $n_i^2$ -Streuung von 32% (bei Vernachlässigung von  $N_C$ - $N_V$ -Änderungen). Unter der Annahme, daß das Borprofil vollständig im Ge-Plateau eingebaut ist, wäre die daraus resultierende  $I_C$ -Streuung in der gleichen Größenordnung wie die in Tabelle 5.3-2. Jedoch ist in den untersuchten HBTs das Borprofil sowohl im Plateau und als auch im Ge-Gradient eingebaut. Im Gradienten überstreicht die Germaniumkonzentration einen Bereich von 7% bis 20%. Nach Gleichung 2.5 resultiert daraus eine Änderung des exponentiellen Terms in Gleichung 2.12 von einem Faktor 83. Dies hat bei geringfügigen Verschiebungen des B-Profiles relativ zum Ge-Profil entsprechend große Änderungen des Kollektorstroms zur Folge. Ebenso können Streuungen des Anstiegs des Ge-Gradienten relativ zum B-Profil Streuungen des  $p(y)/n_i^2(y)$ -Quotienten (Gleichung 2.10) und damit  $I_C$ -Streuungen hervorrufen. Aufgrund der erläuterten Abhängigkeiten können demnach geringfügige  $d_{SiGe}$ -Streuungen (Tabelle 5.3-2) hohe  $I_C$ -Streuungen verursachen, unter der Bedingung, daß die  $d_{SiGe}$ -Streuungen neben den Streuungen der Schichtdicke des Ge-Plateaus auch Streuungen des Ge-Anstiegs im Gradienten relativ zum B-Profil enthalten.

### Einflußgrößen auf die $I_C$ -Homogenität

Im folgenden sollen Einflußfaktoren, die die Homogenität des Kollektorstroms über den Wafer beeinflussen, anhand von Parameterstreuungen über den Wafer diskutiert werden. In Tabelle 5.3-3 sind HBT- und Schichtparameter des Wafers MS38-01 zusammengefaßt. Für die HBT-Parameter wurde jeweils der Mittelwert von 4 Einzelwerten pro Chip gebildet.

Tabelle 5.3-3: HBT- und Schichtparameter an 3 Chips des Wafers MS38-01

| Chip | HBT-Parameter        |                           |                  | Schichtparameter     |               |                         |                          |                          |
|------|----------------------|---------------------------|------------------|----------------------|---------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
|      | $I_C$<br>( $\mu A$ ) | $R_{SBI}$<br>( $\Omega$ ) | $X_{EB}$<br>(nm) | $d_{Si-Cap}$<br>(nm) | $x$<br>(at.%) | $d_{SiGe-ges.}$<br>(nm) | $d_{SiGe-Plat.}$<br>(nm) | $d_{SiGe-Grad.}$<br>(nm) |
| 9    | 18,5                 | 4432                      | 57               | 66                   | 19,8          | 26,6                    | 12                       | 14,6                     |
| 23   | 15,1                 | 4635                      | 52               | 60                   | 19,6          | 24                      | 11                       | 13                       |
| 37   | 16,2                 | 5072                      | 48               | 56                   | 19,7          | 24                      | 11                       | 13                       |

Zwischen Chip 9 und 23 bestehen Unterschiede des Kollektorstroms von 22%. Diese Unterschiede eignen sich gut für eine Diskussion von Einflußfaktoren.  $R_{SBI}$  von Chip 9 ist um 4% kleiner als von Chip 23. Damit ist die elektrisch aktive Bormenge der HBT-Basis im Chip 9 größer als im Chip 23. Nach den Gleichungen 2.9 und 2.10 ist  $I_C$  der Borkonzentration jedoch umgekehrt proportional, so daß die Unterschiede der Bordosis in der Basis als Ursache der  $I_C$ -Unterschiede ausscheiden.

Die Emitter-Basis-Raumladungsweite  $X_{EB}$  von Chip 9 ist um ca. 10% größer als von Chip 23. Der gleiche prozentuale Unterschied ist bei  $d_{Si-Cap}$  zu verzeichnen, so daß die  $X_{EB}$ -Änderung offensichtlich durch die Siliziumabscheidung verursacht wird.

Als weiterer Einflußfaktor auf die  $I_C$ -Streuung ist die maximale Germaniumkonzentration im Plateau ( $x$ ) für alle drei Chips vergleichbar und damit vernachlässigbar.

Die SiGe-Schichtdickendifferenz von Chip 9 und 23 erfordert eine genauere Betrachtung des Ge-Profiles, insbesondere einen Vergleich des Germaniumgradienten dieser Chips. Zu diesem Zweck sind die Ge-Profile von Chip 9, 23 und 37 zusammen mit der Verteilung des Kollektorstroms des Wafers MS38-01 in Abbildung 5.3-4 gegenübergestellt. Zum besseren Vergleich sind die Ge-Profile so verschoben, daß sie bei einer Tiefe von 83nm an den niedrig dotierten Kollektor grenzen. Die drei Ge-Profile unterscheiden sich in der Gesamt- ( $d_{SiGe-ges.}$ ), der Plateauschichtdicke ( $d_{SiGe-Plat.}$ ) und in der Schichtdicke des Gradienten ( $d_{SiGe-Grad.}$ ) (Tabelle 5.3-3 und Abbildung 5.3-4). Das Ge-Profil von Chip 9 besitzt die größte Plateaudicke und den flachsten Anstieg des Ge-Gradienten. Setzt man voraus, daß die B-Profile von Chip 9 und 23 in gleicher Tiefe liegen, ist der ortsabhängige  $p(y)/n_i^2(y)$ -Quotient für Chip 9 größer als für Chip 23. Nach Gleichungen (2.9) und (2.10) resultiert daraus für Chip 9 ein größerer Kollektorstrom als für Chip 23. Die Unterschiede der Ge-Profile der betrachteten Chips werden hauptsächlich von Temperaturstreuungen über den Wafer beim Epitaxieprozeß hervorgerufen. Wie im Fall der Siliziumdeckschichtdicke liegt das Temperaturmaximum bei der SiGe-Epitaxie an der Fase (Abbildung 5.3-4 oben).

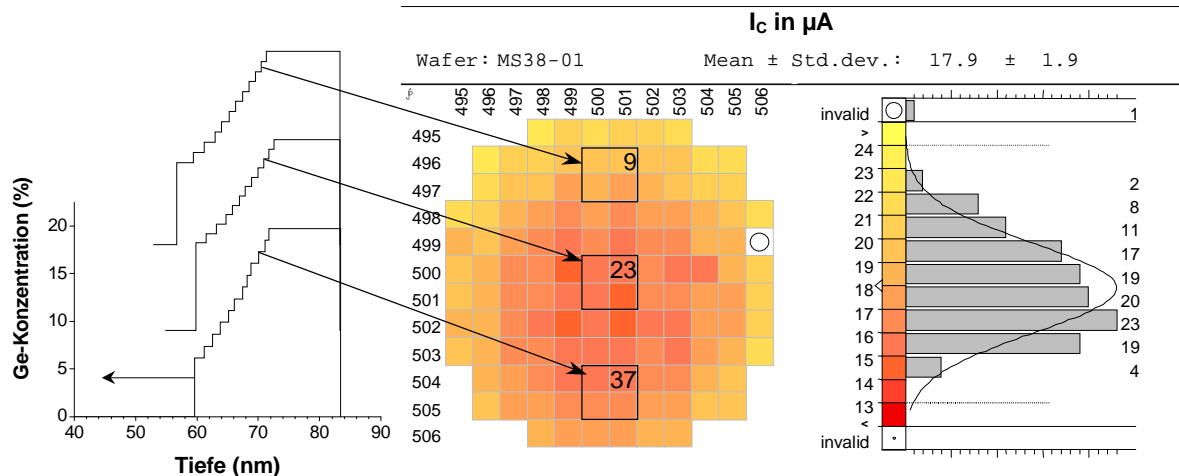


Abbildung 5.3-4: Ge-Profile der Chips 9, 23, 37 und Kollektorstromverteilung von Wafer MS38-01

### 5.3.2 Vergleich der $I_C$ -Mittelwerte und -Streuungen von LPCVD-basierten mit denen RPCVD-basierter HBTs

Im folgenden werden die  $I_C$ -Mittelwerte und -Streuungen von HBTs, die unter Verwendung des LPCVD- und des RPCVD- Epitaxieverfahrens hergestellt wurden, direkt miteinander verglichen. Die HBTs wurden im gleichen technologischen Fertigungsprozeß in gleichen Losen hergestellt. Die  $I_C$ -Verläufe beider HBTs sind in Abbildung 5.3-5 dargestellt.

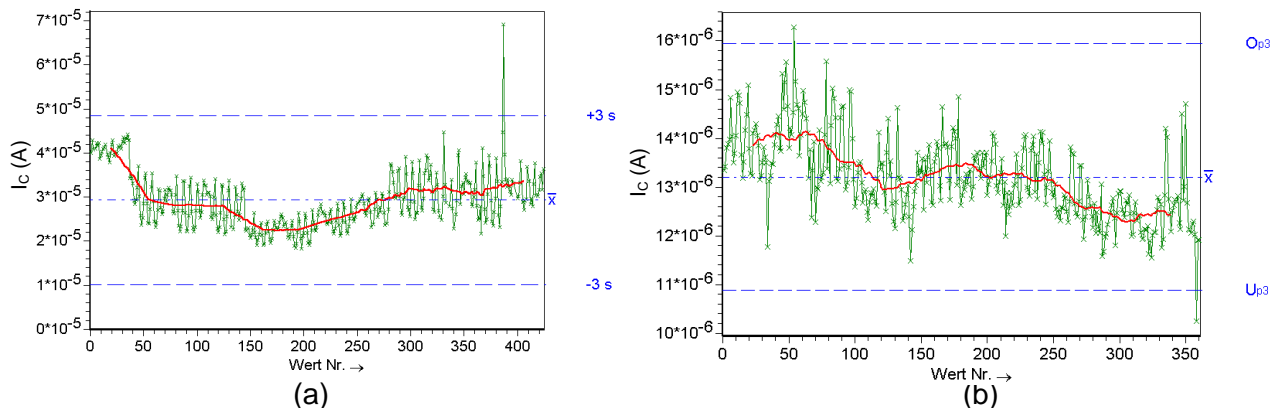


Abbildung 5.3-5:  $I_C$ -Verlauf des LPCVD-basierten HBT2a (a) und des RPCVD-basierten HBT2b (b)

In Tabelle 5.3-4 sind die  $I_C$ -Mittel- und -Streuwerte zusammen mit den entsprechenden statistischen Kennwerten von  $R_{SBI}$  und  $X_{EB}$  aufgeführt.

Tabelle 5.3-4: Mittelwerte und Streuungen der Transistorparameter des LPCVD-basierten HBT2a und des RPCVD-basierten HBT2b

|                        | HBT2a      |           |               | HBT2b      |           |               |
|------------------------|------------|-----------|---------------|------------|-----------|---------------|
|                        | Mittelwert | $1\sigma$ | $1\sigma$ (%) | Mittelwert | $1\sigma$ | $1\sigma$ (%) |
| $I_C$ ( $\mu A$ )      | 29         | 7,1       | 24            | 13         | 0,8       | 6             |
| $R_{SBI}$ ( $\Omega$ ) | 3505       | 314       | 9             | 4359       | 70        | 2             |
| $X_{EB}$ (nm)          | 42         | 4,6       | 11            | 30         | 2         | 6             |

Die Mittelwerte der Parameter beider HBTs unterscheiden sich signifikant voneinander. So differieren jeweils die Mittelwerte von  $I_C$  um ca. einen Faktor 2, von  $R_{SBI}$  um 24% und von  $X_{EB}$  um 40%. Die Abweichung der Raumladungsweiten resultiert aus den unterschiedlichen Sili-

ziumdeckschichten des HBT2a (60nm) und des HBT2b (45nm). Unterschiede der Bordosis führen zur Differenz der  $R_{SBI}$ -Mittelwerte beider HBTs.

Zur Diskussion der unterschiedlichen  $I_C$ -Mittelwerte des HBT2a und HBT2b sind die entsprechenden mit XRD bestimmten Ge-Profile zusammen mit angenommenen B-Profilen (B1, B2, B3) gleicher B-Dosis in Abbildung 5.3-6 dargestellt.

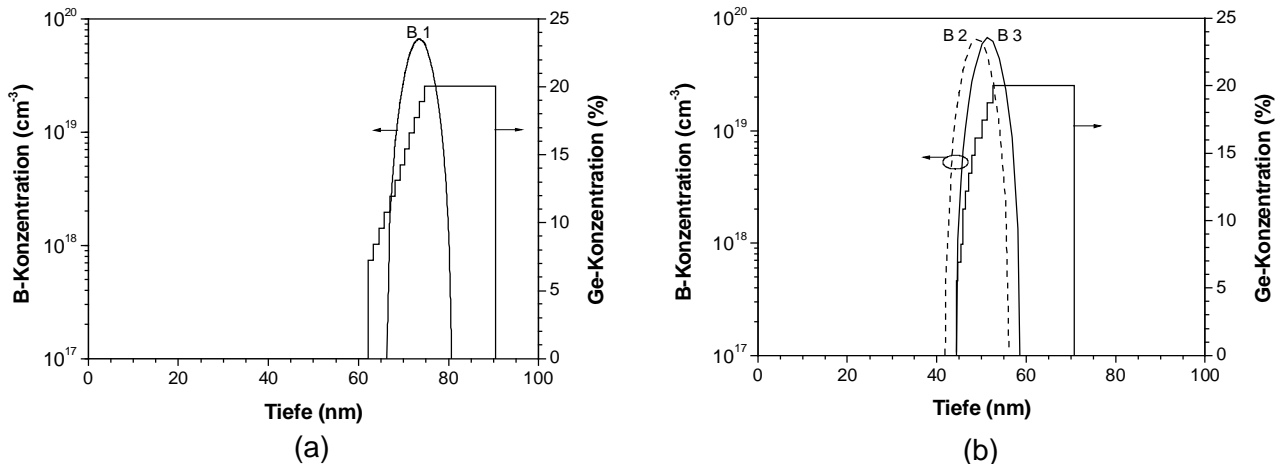


Abbildung 5.3-6: Ge-Profile mit angenommenen B-Profilen (B1, B2, B3) für HBT2a (a) und HBT2b (b)

Aus den B-Profilen B1 und B3 und den entsprechenden Ge-Profilen ergibt sich aus Gleichungen 2.5 und 2.9 - 2.12 für HBT2a und HBT2b ein  $I_C$ -Unterschied von 20% unter der Annahme, daß  $A_E$ ,  $V_{BE}$ ,  $V_{CB}$ ,  $D_n(y)$  für beide HBTs gleich sind. Eine Verschiebung des B- zum Ge-Profil, wie in Abbildung 5.3-6b (B2 und B3), bewirkt eine wesentlich stärkere Änderung des Kollektorstroms. In diesem Fall ändert sich  $I_C$  um einen Faktor 10. Daraus folgt, daß die wahrscheinlichste Ursache der  $I_C$ -Unterschiede in Tabelle 5.3-4 eine Verschiebung des B-Profils relativ zum Ge-Profil ist.

Die Streuungen der HBT-Parameter des HBT2a sind deutlich größer als die des RPCVD-basierten HBT2b. Insbesondere die  $I_C$ -Streuung liegt mit 24% in der Größenordnung des LPCVD-basierten HBT1. Wie im Fall des HBT1 können Streuungen der Bordosis von HBT2a nicht die einzige Ursache der  $I_C$ -Streuungen sein, da die  $R_{SBI}$ -Streuung nur 9% beträgt. Demnach tragen auch Streuungen des B- zum Ge-Profil sowie Streuungen des Ge-Profils zur  $I_C$ -Streuung mit bei.

Die  $I_C$ -Streuung des HBT2b kann ebenfalls nicht nur mit Streuungen der Bordosis ( $R_{SBI}$ ) erklärt werden (Tabelle 5.3-4). Auch in diesem Fall ist eine Lagestreuung des B- zum Ge-Profil als Ursache der  $I_C$ -Streuung wahrscheinlich. Außerdem wirkt sich der steile Ge-Gradient des HBT2b bei Lagestreuungen des B-Profils empfindlicher als beim HBT2a auf Kollektorstromstreuungen aus.

Der Vergleich der Parameter des LPCVD- und des RPCVD-basierten HBT2 ergibt, daß das RPCVD-Epitaxieverfahren eine homogenere und reproduzierbarere Abscheidung des B- und des Ge-Profils als das LPCVD-Epitaxieverfahren gestattet.

### 5.3.3 $I_C$ -Mittelwerte und -Streuungen für mittels RPCVD hergestellte SiGeC-HBTs

Nachfolgend werden die  $I_C$ -Mittelwerte und -Streuungen des RPCVD-basierten HBT3 bestimmt, der über eine Kohlenstoff-dotierte SiGe-Basis mit einer hohen Bordosis verfügt.

In Abbildung 5.3-7 sind die Verläufe von  $I_C$ ,  $X_{EB}$  und  $R_{SBI}$  aller betrachteten Stichproben dargestellt. Die gleitenden Mittelwerte von  $I_C$  und  $R_{SBI}$  weisen ähnliche Verläufe auf, die auf einen möglichen Zusammenhang beider Parameter deuten. Zwischen dem  $I_C$ - und dem  $X_{EB}$ -Verlauf sind keine Korrelationen zu verzeichnen.



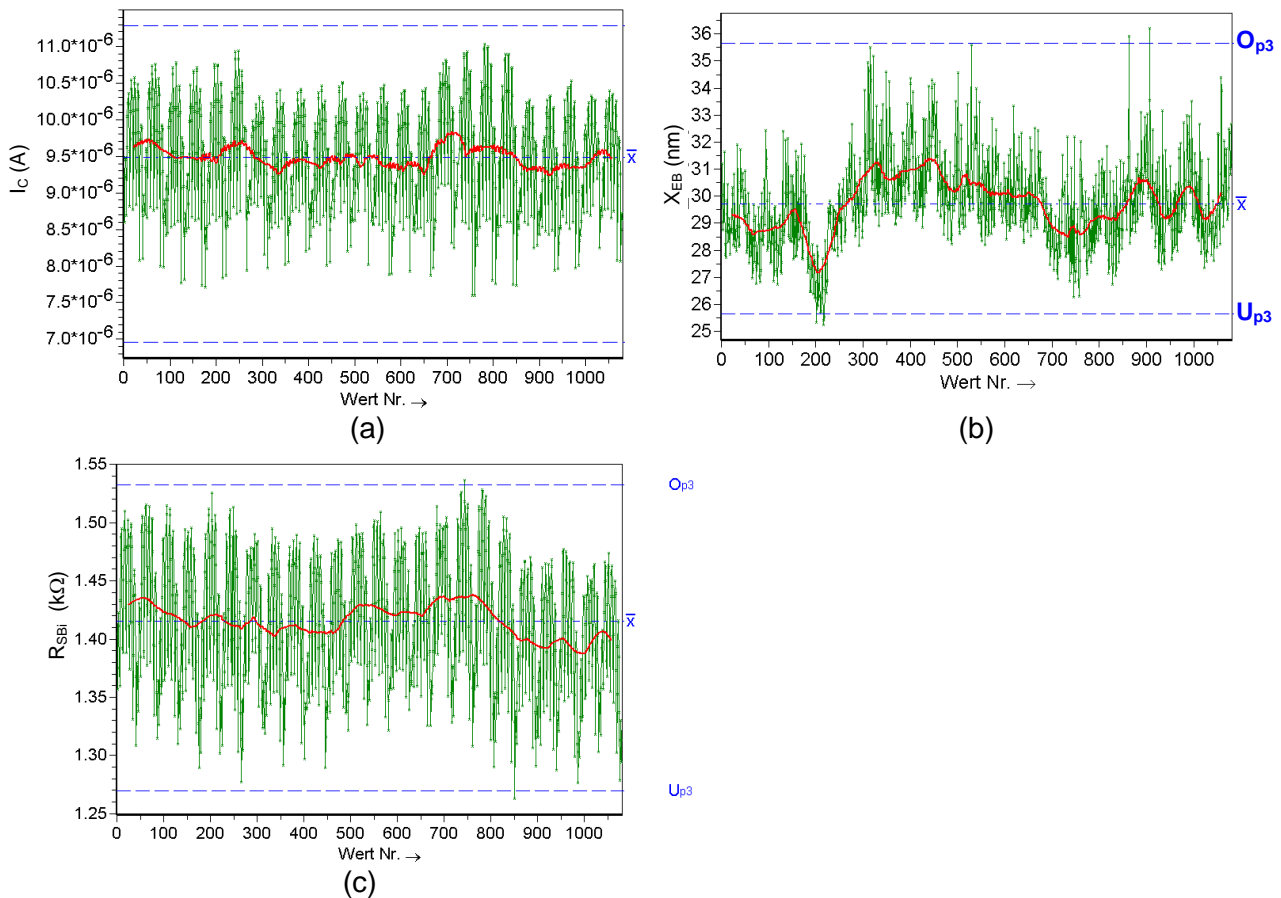


Abbildung 5.3-7:  $I_C$ - (a),  $X_{EB}$ - (b) und  $R_{SBI}$ -Verlauf (c) des RPCVD-basierten HBT3

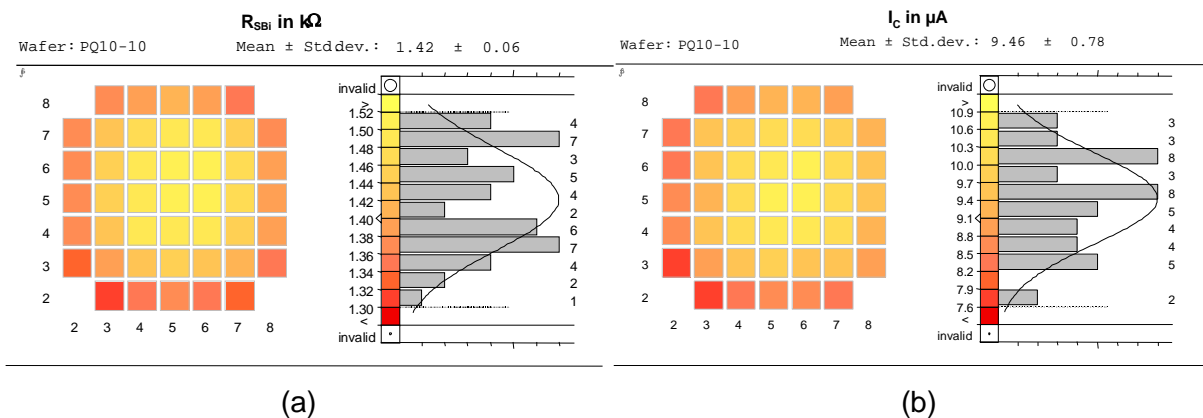
Die resultierenden Mittelwerte und Streuungen der in Abbildung 5.3-7 dargestellten HBT-Parameter sind in folgender Tabelle 5.3-5 zusammengefaßt.

Tabelle 5.3-5: Mittelwerte und Streuungen der HBT3-Parameter

|                        | HBT3       |           |               |
|------------------------|------------|-----------|---------------|
|                        | Mittelwert | $1\sigma$ | $1\sigma$ (%) |
| $I_C$ ( $\mu A$ )      | 9,5        | 0,7       | 7,5           |
| $R_{SBI}$ ( $\Omega$ ) | 1415       | 55        | 4             |
| $X_{EB}$ (nm)          | 29,7       | 1,7       | 6             |

Der  $R_{SBI}$ -Mittelwert von 1415  $\Omega$  widerspiegelt die hohe Bordosis der HBT-Basisregion. Der  $X_{EB}$ -Mittelwert von ca. 30nm wird wie im Fall des HBT2b durch eine Siliziumdeckschichtdicke von 45nm eingestellt.

Die prozentuale  $I_C$ -Streuung ist mit 7,5% nur geringfügig größer als der entsprechende Wert des HBT2b (6,1%), d.h. mit dem RPCVD-Verfahren lassen sich auch kohlenstoffdotierte Ge-Profile mit einer hohen Bordosis mit sehr guter Homogenität und Reproduzierbarkeit abscheiden. Die  $R_{SBI}$ -Streuung ist im Vergleich zur  $I_C$ -Streuung um ca. einen Faktor 2 kleiner, so daß neben den Streuungen der Bordosis auch die Lagestreuungen des B- zum Ge-Profil sowie Streuungen des Ge-Profiles als Ursachen der  $I_C$ -Streuung in Frage kommen. Gegenüber der  $R_{SBI}$ -Streuung des HBT2b ist die des HBT3 erhöht (Faktor 2). Zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen  $R_{SBI}$  und  $I_C$  werden nun von beiden Parametern die Verteilungen über den Wafer betrachtet (Abbildung 5.3-8).


 Abbildung 5.3-8:  $R_{S_{Bi}}$ - (a) und  $I_C$ -Verteilung (b) über den Wafer des RPCVD-basierten HBT3

Beide Waferverteilungen weisen große Ähnlichkeiten auf: Im Waferzentrum befinden sich die Maxima und am Waferrand sind sowohl  $I_C$  als auch  $R_{S_{Bi}}$  minimal. Demnach ist davon auszugehen, daß beim HBT3 die  $I_C$ -Homogenität über den Wafer hauptsächlich von der  $R_{S_{Bi}}$ -Homogenität beeinflusst wird.

#### Fazit der Bewertung des Bor- und des SiGe-Profiles anhand $I_C$

In Tabelle 5.3-6 sind die Ergebnisse der statistischen Bewertung der Kollektorströme aller untersuchten HBTs zusammengefaßt. Zu Vergleichszwecken ist die Streuung der Stromverstärkung des Referenz-HBTs dargestellt, weil keine statistischen Daten von Kollektorströmen der Referenz-HBTs publiziert wurden.

 Tabelle 5.3-6: Kollektorströme  $I_C$  der untersuchten HBTs und Stromverstärkung  $\beta$  des Referenz-HBTs [2]

| HBT-Parameter:     | I <sub>c</sub> (A)   |     |                      |     |                      |     |                      |     | β       |      |
|--------------------|----------------------|-----|----------------------|-----|----------------------|-----|----------------------|-----|---------|------|
| Epitaxieverfahren: | LPCVD                |     |                      |     | RPCVD                |     |                      |     | UHVCVD  |      |
|                    | HBT1                 |     | HBT2a                |     | HBT2b                |     | HBT3                 |     | IBM-HBT |      |
|                    | Mittel               | 1σ  | Mittel               | 1σ  | Mittel               | 1σ  | Mittel               | 1σ  | Mittel  | 1σ   |
|                    | -wert                | (%) | -wert                | (%) | -wert                | (%) | -wert                | (%) | -wert   | (%)  |
|                    | 1,7x10 <sup>-5</sup> | 34  | 2,9x10 <sup>-5</sup> | 24  | 1,3x10 <sup>-5</sup> | 6,1 | 9,5x10 <sup>-6</sup> | 7,5 | *)      | 14,7 |

\*) keine Angabe

Die  $I_C$ -Streuung LPCVD-basierter HBTs (HBT1 und HBT2a) sind deutlich größer als die  $\beta$ -Streuung des UHVCVD-basierten HBTs. Da die  $R_{S_{Bi}}$ -Streuungen der LPCVD- und UHVCVD-basierenden HBTs vergleichbar sind (Tabelle 5.2-1), werden die  $I_C$ -Streuungen der LPCVD-basierten HBTs in erster Linie durch Lagestreuungen des B- zum Ge-Profil und von Streuungen des Ge-Profiles hervorgerufen.

Die RPCVD-basierten HBTs (HBT2b und HBT3) besitzen deutlich kleinere  $I_C$ -Streuungen als die LPCVD-basierten. Der wesentliche Einflußfaktor auf die  $I_C$ -Streuungen ist die Streuung der Bordosis. Die  $I_C$ -Streuungen der RPCVD-basierten HBTs sind kleiner als die  $\beta$ -Streuung der UHVCVD-basierten Referenz-HBTs. Dieses Ergebnis ist um so bemerkenswerter, als daß Schwankungen der untersuchten Ge- und B-HBT-Profile (HBT1, HBT2 und HBT3) wesentlich empfindlichere Auswirkungen auf die Kollektorströme als Schwankungen der Profile des Referenz-HBTs haben. Die Ursache liegt im Ge-Profil des UHVCVD-HBTs, das eine maximale Germaniumkonzentration von 7 % hat. Bei gleicher Bordosis ist das Quadrat der Eigenleitungsdichte dieser SiGe-Basissschicht um ca. einen Faktor 10 größer als  $n_i^2$  von Silizium. Im Gegensatz dazu besitzen  $Si_{0,8}Ge_{0,2}$ -Schichten (Ge-Konzentration im Plateau von HBT1, HBT2 und HBT3)  $n_i^2$ -Werte, die sich bei gleicher Bordosis gegenüber  $n_i^2$  des Siliziums um einen Faktor 130 unterscheiden [3]. Damit wird die  $I_C$ -Streuung im Fall des UHVCVD-HBTs hauptsächlich durch die Reproduzierbarkeit und Homogenität des B-Profiles beeinflusst, während im Fall der hier untersuchten HBTs die Reproduzierbarkeit und Homogenität des B- zum Ge-Profil Auswirkungen auf  $I_C$  haben.

## 5.4 Bewertung der epitaktischen Schichtqualität anhand Leckstrom begrenzter Ausbeuten

Grundvoraussetzung für die Epitaxie von SiGe/Si-Heteroschichten mit guter kristalliner Qualität ist eine exzellente Epitaxie-Substrat-Grenzfläche mit geringen Sauerstoff- und Kohlenstoffkontaminationen. In diesem Abschnitt wird im ersten Teil die Leckstrom begrenzte Ausbeute von HBT-Arrays zur Bewertung der epitaktischen Schichtqualität ermittelt und mit Literaturdaten verglichen. Im zweiten Teil wird im Fall des LPCVD-basierten HBT1 die Ausbeute von Kollektor-Emitter-Leckströmen zur Bewertung der epitaktischen Schichtqualität untersucht. Ferner werden Korrelationen zwischen der epitaktischen Defektdichte und den Kollektor-Emitter- und Emitter-Kollektor-Leckströmen betrachtet.

### 5.4.1 Leckstrom begrenzte Ausbeute von HBT-Arrays im Vergleich zu Referenzdaten

Für die Untersuchungen dieses Abschnitts nehmen wir auf ein publiziertes Ausbeutekriterium eines Multiemitter-HBTs Bezug [4]. Danach gilt ein HBT mit einem Array aus 30 000 Emittoren und einer jeweiligen Emitterfläche von  $(1,5 \times 1,5) \mu\text{m}^2$  als defektbehaftet, wenn sein Kollektorsperrstrom größer 100 pA ist (mit  $V_{CB}=1\text{V}$ ;  $V_{BE}=0,1\text{V}$ ) [4]. Daraus ergibt sich eine Stromdichte von  $1,5 \text{ fA}/\mu\text{m}^2$ .

In dieser Arbeit wurde an 4096 parallelgeschalteten HBTs (HBT3-Profil) mit einer jeweiligen Emitterfläche von  $0,5 \mu\text{m}^2$  der Kollektorstrom für  $V_{CB}=1\text{V}$  und  $V_{BE}=0,1\text{V}$  gemessen. Die untersuchte Ausbeutestruktur unterscheidet sich von der publizierten Multiemitterausbeutestruktur im Basis-Kollektor-Gebiet: Der Umfang- zu Flächenanteil des Basis-Kollektor-Gebiets des Multiemitter-HBTs ist deutlich kleiner als der des HBT-Arrays. Folglich ist der Einfluß elektrisch wirksamer Defekte der Seitenwände des Basis-Kollektor-Gebietes für ein Multiemitterarray deutlich kleiner als für ein HBT-Array. Damit sind größere Leckstromdichten für die HBT-Arrays als für den Multiemitter-HBT zu erwarten.

Für die untersuchten HBT-Arrays zeigt Abbildung 5.4-1 die absolute und die kumulative Häufigkeit des Kollektorstroms  $I_C$ .

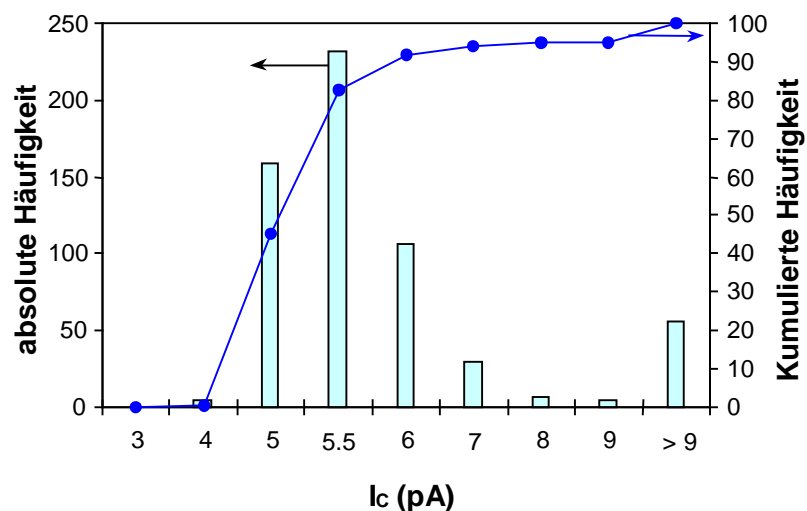


Abbildung 5.4-1: Absolute und kumulative Häufigkeit des Kollektorstroms  $I_C$  der untersuchten HBT-Arrays

Aus dem Kurvenverlauf der kumulativen Häufigkeit ergibt sich, daß etwa 90% aller Stichproben im  $I_C$ -Intervall zwischen 4 pA und 6 pA liegen. Diese Werte entsprechen Stromdichten von  $1,9 \text{ fA}/\mu\text{m}^2$  bzw.  $2,9 \text{ fA}/\mu\text{m}^2$ . Diese Stromdichten sind aufgrund des oben erwähnten Unterschiedes im Basis-Kollektor-Gebiet der HBT-Arrays gegenüber den Multiemitter-HBTs mit den Referenzwerten vergleichbar [4].

### 5.4.2 Kollektor-Emitter- und Emitter-Kollektor-Leckströme von LPCVD-HBTs und deren Korrelation zu Defektdichten

Für das LPCVD-Epitaxieverfahren wurde die Ausbeute von Kollektor-Emitter-Leckströmen  $I_{CEO}$  bei nichtkontakter Basis (mit  $V_{CE} = 2V$ ) an großflächigen Transistoren (HBT1 mit  $A_E = 100 \times 100 \mu m^2$ ;  $A_B = 200 \times 100 \mu m^2$ ) bestimmt. In Abbildung 5.4-2 sind die absolute und die kumulierte Häufigkeiten als Funktion der  $I_{CEO}$ -Klassen von 50096 Meßwerten dargestellt.

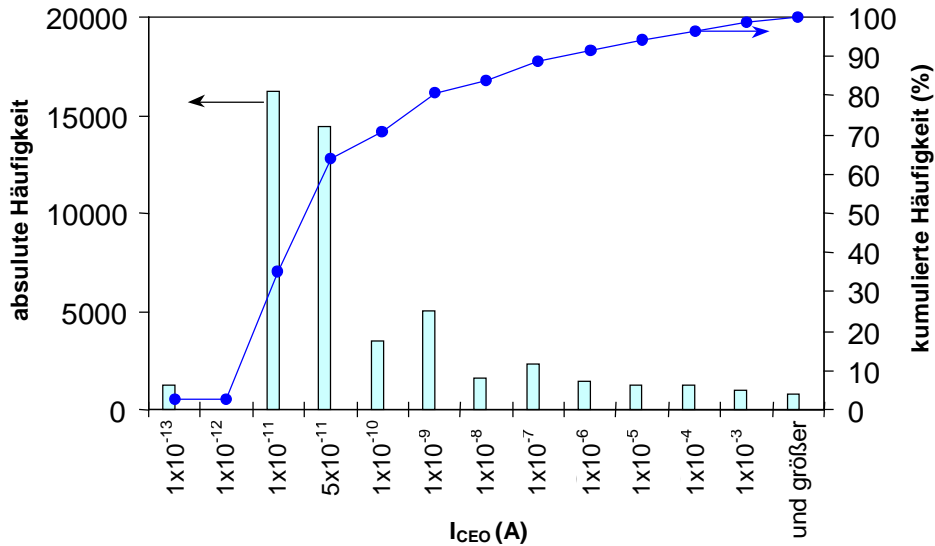


Abbildung 5.4-2: Absolute und kumulative Häufigkeit von  $I_{CEO}$  der untersuchten großflächigen HBTs ( $A_E = 100 \times 100 \mu m^2$ ;  $A_B = 200 \times 100 \mu m^2$ )

Aus dem Kurvenverlauf der kumulativen Häufigkeit geht hervor, daß 63% der untersuchten Stichproben ein Kollektor-Emitter-Leckstrom von 50 pA und kleiner besitzen. Bezogen auf die Basisfläche entspricht das einer Stromdichte von  $2,5 \text{ fA}/\mu m^2$ . Diese Stromdichte ist mit dem Referenzwert vergleichbar, weil bei den hier bewerteten großflächigen HBTs folgende konstruktionsbedingte und technologische Einflüsse zur Erhöhung des Kollektor-Emitter-Leckstromes beitragen: Gemäß Abbildung 3-8 ist der HBT an den Seiten des Basis-Kollektorgebietes mit Spacern versehen. Aufgrund von Streuungen im Herstellungsprozeß ist es möglich, daß diese Spacer den oberen Teil des Basismesas nicht vollständig umschließen. Nachfolgend kann an diesen Seitenwänden der Basisanschluß tiefer siliziert werden, so daß dadurch Leckströme generiert werden, die  $I_{CEO}$  erhöhen.

Der hier bewertete HBT wurde im Basisanschlußgebiet mit einem  $BF_2$ -Implant zur Reduzierung des Basiswiderstands versehen, der die Basis-Kollektor-Dotierungsprofile verändert. Im Ergebnis wird in den implantierten Gebieten die Basis-Kollektor-Raumladungsweite reduziert. Weil die  $BF_2$ -implantierte Basisfläche der untersuchten HBTs in der Größenordnung der Emitterfläche sind, ergibt sich daraus ein erhöhtes Grundleckstromniveau.

Nachfolgend werden Oberflächendefekte von HBT-Schichtstapeln mittels Dunkelfeldmikroskopie bewertet und Zusammenhänge zwischen diesen Oberflächendefekten und HBT-Leckströmen untersucht [5]. Die Dunkelfeldmikroskopie liefert Streulichtbilder von epitaktischen HBT-Schichtstapeln, die in vier Defektklassen eingeteilt wurden. Typische Bilder dieser Defektklassen sind in Abbildung 5.4-3a eingefügt. Die Defektklassen können folgendermaßen beschrieben werden: Klasse 1 zeigt ein diffuses Streulichtbild, das auf einen HBT-Schichtstapel hoher Defektdichte hinweist. Si/SiGe/Si-Schichtstapel der Defektklasse 2 zeigen einerseits eine hohe Dichte von Streuzentren und andererseits ein nichtstreuendes Untergrundsignal. Während Schichtstapel der Defektklasse 3 nur einige wenige Streuzentren besitzen, liefert die Dunkelfeldmikroskopie für epitaktische Schichten der Defektklasse 4 - wie im Fall von Si Substraten - kein Streusignal.

Abbildung 5.4-3 zeigt die Leckströme  $I_{ECO}$  (a) und  $I_{CEO}$  (b) von HBTs mit Si/SiGe/Si Schichtstapeln, die sich in der Defektklasse unterscheiden.

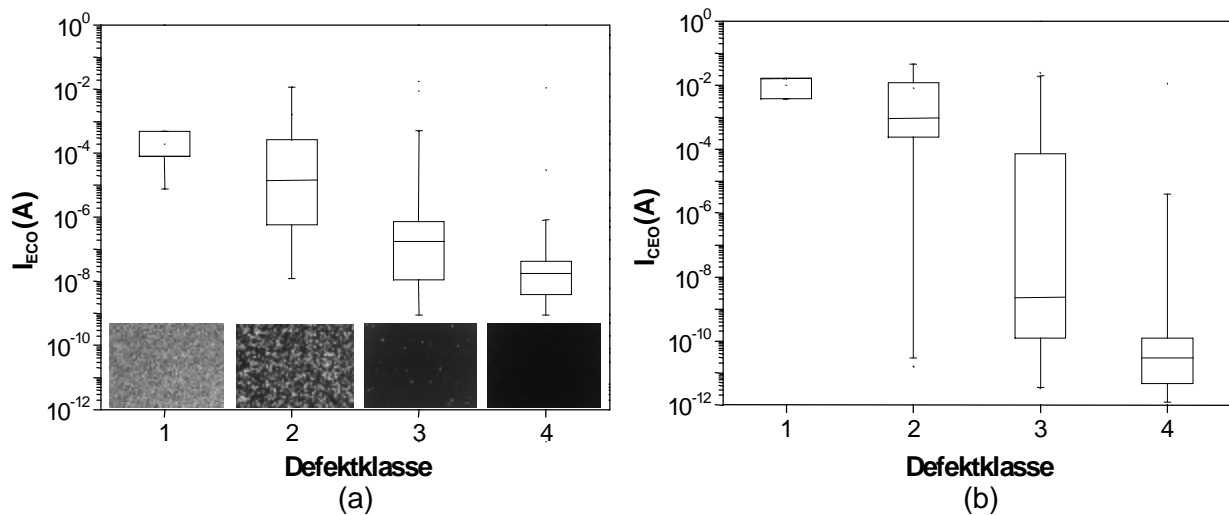


Abbildung 5.4-3: Leckströme  $I_{ECO}$  (a) und  $I_{CEO}$  (b) von HBTs mit Si/SiGe/Si Schichtstapeln, die sich in der Defektklasse unterscheiden. Typische Streulichtbilder der Defektklassen sind in Abb. 5.4-3a eingefügt

Während  $I_{ECO}$  deutlich von Defektklasse 1 bis 4 abfällt, ist die Korrelation zwischen  $I_{CEO}$  und den Defektklassen nicht so eindeutig. Auffällig ist die größere Streuung der  $I_{CEO}$ -Werte von HBTs der Defektklasse 3 im Vergleich zu den entsprechenden  $I_{ECO}$ -Werten. Dieses Verhalten kann mit kristallinen Defekten im Si/SiGe/Si-Schichtstapel erklärt werden. Abbildung 5.4-4 zeigt einen solchen Defekt innerhalb des epitaktischen Si/SiGe/Si-Schichtstapels. Dieses polykristalline Korn hat seinen Ursprung am Si-Puffer-SiGe-Interface. Es weist auf eine Interfacekontamination während des Übergangs zwischen Si- und SiGe-Epitaxie hin. Unter der Annahme von drei verschiedenen Typen solcher polykristalliner Körner kann das unter-

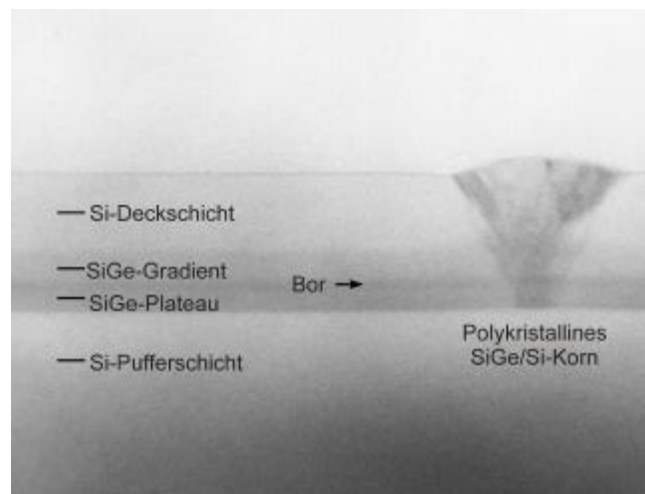


Abbildung 5.4-4: TEM-Cross-Section (Hellfeld) eines Si/SiGe/Si-Schichtstapels mit einem polykristallinen Korn, das am Interface zwischen Si-Puffer und SiGe seinen Ursprung hat.

schiedliche Verhalten von  $I_{CEO}$  und  $I_{ECO}$  im Fall der Defektklasse 3 erklärt werden (Abbildung 5.4-3). Der erste Typ hat seinen Ursprung am Interface zwischen dem Substrat und der Si-Pufferschicht, der zweite Typ beginnt am Si-Puffer/SiGe-Interface und der dritte wächst vom SiGe/Si-Deckschicht-Interface (Abbildung 5.4-5).

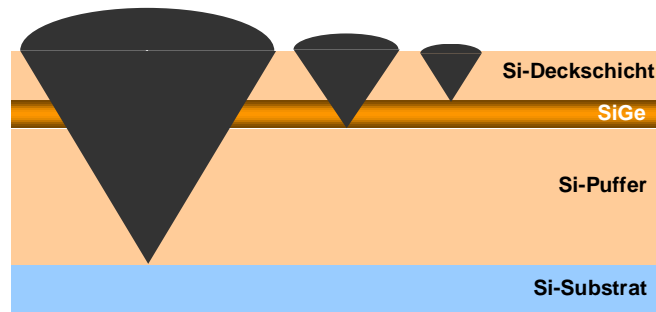


Abbildung 5.4-5: Drei Typen polykristalliner Körner, die während der epitaktischen Abscheidung des Si/SiGe/Si-HBT-Schichtstapels entstehen können.

Polykristalline Körner der ersten beiden Typen erhöhen  $I_{\text{CEO}}$ , weil sie sich in der Raumladungszone der in Sperrichtung betriebenen Basis-Kollektor-Diode befinden. Da die Emitter-Basis-Diode in Durchlaßrichtung betrieben wird, sind polykristalline Körner des dritten Typs nicht relevant. Diese tragen zu einer Erhöhung von  $I_{\text{ECO}}$  bei, weil bei diesem Meßregime die Emitter-Basis-Diode in Sperrichtung betrieben wird. Demnach können die drei Typen polykristalliner Körner, die große  $I_{\text{CEO}}$ -Streuung der Defektklasse 3 verursachen (Abbildung 5.4-3b).

## 6 Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit bestand in der Bewertung zweier Epitaxieverfahren. Insbesondere wurde untersucht, inwieweit diese Verfahren geeignet sind, die hohen Anforderungen an die Abscheidung von SiGe/Si-Heteroschichtstapeln zur Herstellung von SiGe-HBTs unter Anlegung industrieller Maßstäbe zu erfüllen.

Die Bewertung eines LPCVD- und eines RPCVD-Epitaxieverfahrens erfolgte anhand von HBT-Daten, deren Reproduzierbarkeit und Homogenität mit publizierten HBT-Daten des in der Industrie etablierten UHVCVD-Verfahrens [1] verglichen wurden.

Darüber hinaus wurden kritische Epitaxieprozeßparameter betrachtet, die die HBT-Parameter maßgeblich beeinflussen.

Die Bewertung der Homogenität und Reproduzierbarkeit der epitaktischen Abscheidung von Siliziumschichten, sowie B- und Ge-Profilen erfolgte mit folgenden HBT-Parametern:

- Emitter-Basis-Raumladungsweite  $X_{EB}$  zur Charakterisierung der Siliziumschichtdicke,
- innerer Basisschichtwiderstand  $R_{SBI}$  zur Bewertung der Abscheidung des Borprofils der HBT-Basis,
- Kollektorstrom  $I_C$  zur Bewertung des Ge- und des B-Profils von HBTs,
- Leckstrom begrenzte Ausbeuten zur Charakterisierung der kristallinen Perfektion von Si/SiGe/Si-Heteroschichten.

Im Resultat dieser Arbeit erfüllt das RPCVD-Verfahren die Anforderungen an die Schichtabscheidung von SiGe/Si-Heterostrukturen, weil die Homogenität und Reproduzierbarkeit von HBT-Parametern besser als die des Referenz-HBT ist.

Bei LPCVD-basierenden HBTs ist eine Verbesserung der Homogenität und Reproduzierbarkeit des Kollektorstroms notwendig.

Folgende Hauptergebnisse wurden in dieser Arbeit gewonnen:

1. Mit dem RPCVD-Epitaxieverfahren sind SiGe-HBTs herstellbar, deren elektrische Parameter  $X_{EB}$ ,  $R_{SBI}$  und  $I_C$  nur geringe Wafer-zu-Wafer-Streuungen (Reproduzierbarkeit), Streuungen über den Wafer (Homogenität) sowie Streuung aller Stichproben aufweisen (siehe Abbildung 6-1).

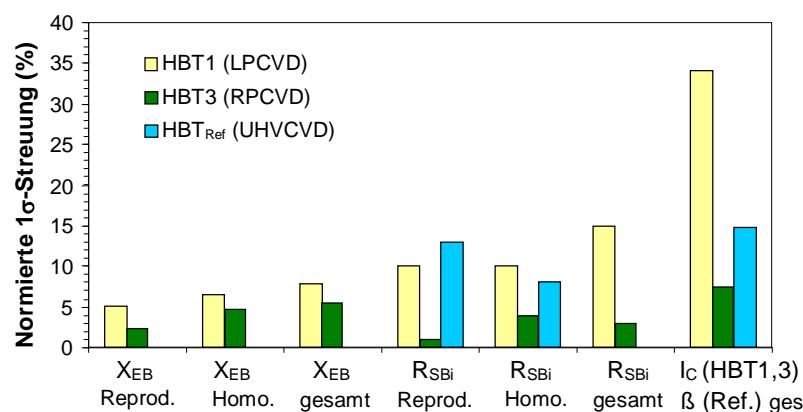


Abbildung 6-1: Normierte Wafer-zu-Wafer-Streuungen (Reproduzierbarkeit) und Streuungen über den Wafer (Homogenität) sowie Streuung aller Stichproben (gesamt) der bewerteten HBT-Parameter am Beispiel des HBT1, des HBT3 sowie eines Referenz-HBT [1,2]

Die Reproduzierbarkeit und die Homogenität von  $X_{EB}$  und  $R_{SBI}$  der mittels RPCVD hergestellten HBTs ist deutlich besser als für LPCVD-basierte HBTs. Gegenüber den entsprechenden  $R_{SBI}$ -Streuungen von UHVCVD-SiGe-HBTs [1,2] sind die des HBT3 ebenfalls deutlich kleiner. Die  $I_C$ -Streuung des HBT3 ist kleiner als die  $\beta$ -Streuung des Referenz-

HBT. Die geringeren Streuungen der mit dem RPCVD-Verfahren hergestellten HBTs sind um so bemerkenswerter, als die hier benutzte Kombination von Ge- und B-Profilen deutlich empfindlicher gegenüber Schwankungen des Epitaxieprozesses und nachfolgender thermischer Prozesse ist, verglichen mit den Profilen der UHVCVD-Transistoren.

2. Die Parameter der mit LPCVD hergestellten HBTs weisen generell höhere Streuungen als die HBTs des RPCVD-Verfahrens auf. Am Beispiel des HBT1 und HBT3 ist dieses Verhalten in Abbildung 6-1 deutlich ersichtlich. Gegenüber den  $R_{SBI}$ -Streuungen des Referenz-HBT sind die Streuungen LPCVD-basierter HBTs vergleichbar. Hingegen ergeben sich für LPCVD-basierte HBTs höhere  $I_c$ -Streuungen als die entsprechenden  $\beta$ -Streuungen des Referenz-HBTs. Den größten Einfluß auf die  $I_c$ -Streuungen haben Schwankungen der Lage des B- zum Ge-Profil.
3. Als der Prozeßparameter mit dem größten Einfluß auf die untersuchten HBT-Parameter hat sich für beide Epitaxieverfahren die Abscheidetemperatur erwiesen. Hauptursache für die deutlich geringeren Streuungen der HBT-Parameter im Falle der RPCVD-Epitaxie ist die bessere Homogenität und Reproduzierbarkeit der Abscheidetemperatur.
4. Die Gasströmungsverhältnisse im Epitaxiereaktor bestimmen bei der epitaktischen Abscheidung besonders im Fall des LPCVD-Reaktors die Homogenität des Boreinbaus in SiGe-Schichten. Durch eine gleichzeitige Erhöhung des Wasserstoffflusses und des Gesamtdruckes kann die Homogenität des Boreinbaus in SiGe signifikant verbessert werden.
5. Mit beiden untersuchten Epitaxieverfahren lassen sich HBTs mit niedrigen Kollektor-Emitter-Leckströmen herstellen, die ähnlich hohe Leckstrom begrenzte Transistorausbeuten besitzen, wie sie für UHVCVD-basierte HBTs bekannt sind [1,2]. Für mittels RPCVD hergestellte HBT-Arrays wurden Kollektorstrom-Ausbeuten von 90% erzielt. Für LPCVD-basierte HBTs wurden Kollektor-Emitter-Leckstrom-Ausbeuten von 63% ermittelt. Es wurden Korrelationen zwischen Oberflächendefektdichten von epitaktischen Si/SiGe/Si-Schichtstapeln und HBT-Leckströmen nachgewiesen.



## Literaturverzeichnis

### 1. Einleitung

- [1] J.D. Cressler, IEEE Transactions on microwave theory and techniques, 46,(5),572 (1998)
- [2] D.C. Ahlgren, M.Gilbert, D.Greenberg, S.J.Jeng,J.Maliowski et al., IEDM Tech. Dig., 859 (1996)
- [3] K.E. Ehwald, D.Knoll, B.Heinemann et al.; IEDM Tech. Dig., 560 (1998)
- [4] D.Nguyen-Ngoc, D.L.Harame, J.C. Malinowski et al, BCTM 1995

### 2. Grundlagen

- [1] E.Kaspar, F.Schäffler, Group IV Compounds, in Semiconductors and Semimetals, edited by T.P.Pearsall, Vol 33, 223-309 (Academic Press, Boston,1991).
- [2] K.Eberl, W. Wegscheider, Si/Ge and Si/SiGe Heterostructures and Superlattices, in Handbook on Semiconductors, edited by T.S. Moss, Vol 3A, Chapter 8, 595-655 (Elsevier Science B.V.,1994)
- [3] R.People, S.A.Jackson, Strained layer Superlattices: Physics, edited by T.P.Pearsall, Kap.4,119-174 (Academic Press, Boston,1991)
- [4] J.H. Van der Merwe, J. Appl. Phys.34,123 (1963)
- [5] J.W. Matthews, A.E. Blakeslee, Defects in epitaxial multilayers I. Misfit dislocations, J. Crystal Growth 27, p.118 (1974)
- [6] J.C. Bean, L.C.Feldman, AT. Fiory, S. Nakahara, I.K.Robinson, J. Appl. Phys.,70,2136 (1991)
- [7] R.People, J.C.Bean, Appl. Phys. Lett. 47, 322 (1985)
- [8] R.People, J.C.Bean, J. Appl. Phys., 49, 229 (1986)
- [9] J.C.Bean, Silicon-based semiconductor heterostructures: column IV bandgap engineering, Proc. IEEE 80. p.571 (1992)
- [10] B.W. Dodson, J.Y.Tsao, Appl. Phys. Lett. 51, 1325 (1987)
- [11] R. People, Phys. Rev. B 32, p. 1405 (1985)
- [12] K. Schade, in Mikoelektroniktechnologie, Kapitel 4, 85 (Verlag Technik, Berlin, München, 1991)
- [13] D.W. Grewe, Mat.Science and Engineering, 22, B18 (1993)
- [14] B.S. Meyerson, Appl. Phys. Lett., 48, 797 (1986)
- [15] J.C. Sturm, Journal of Metals, 43, 44 (1991)
- [16] J.F. Gibbons, D.M. Gronet, K.E. Williams, Appl. Phys. Lett., 47, 721 (1985)
- [17] K.H. Jung, Y.M. Kim, D.L. Kwong, Appl. Phys. Lett., 56, 1775 (1990)
- [18] I.J. Raajimakers, D.Meyer, J.Italiano, Proceedings RTP '97, 243 (1997)

- [19] Y. Oshita, A. Ishitani, T. Takada, J. Crystal Growth 108, 499 (1991)
- [20] L. Vescan, Chemical Vapor Deposition in Handbook of Thin Film Process Techn., edited by D.A. Glocker, S.I. Shah, (IOP, Bristol, 1995)
- [21] A.S. Grove, Physics and Technology of Semiconductor Devices (John Wiley and Sons, New York 1967)
- [22] G. Ghidini, F.W. Smith, J. Electrochem.Soc.,131, 2924 (1984)
- [23] H. Kroemer, proc. IRE, Vol. 45, 1535 (1957)
- [24] S.S. Iyer, G.L. Patton, S.L. Delage, S. Tiwari, J.M.C. Stork, IEDM Tech. Dig., 874 (1987)
- [25] H. Temkin, J.C. Bean, A. Antreasyan, R. Leibengurth, Appl. Phys. Lett. Vol.52, 1089 (1988)
- [26] G.L. Patton, in Tech. Dig. Symp. VLSI Technol., 95, (1989)
- [27] G.L. Patton, Electron. Device Lett., Vol. 11, 171 (1990)
- [28] J.-S. Rieh, B. Jagannathan, H.Chen, et al., IEDM Tech. Dig., 771 (2002)
- [29] S.J. Jeng, B. Jagannathan, J.-S. Rieh, et al., IEEE Electron Device Letters, 22(11), 542, (2001)
- [30] W. Shockley, US-Patent, 2 569 347, 1948
- [31] H. Rücker, Habilitationsschrift, Brandenburgische Technische Universität, (1999)
- [32] A. Pruijmboom, J.W. Slotboom, D.J. Gravesteijn, C.W. Fredriksz, A.A. van Gorkum, R.A. van de Heuvel, J.M.L. van Rooij-Mulder, G.Streutker, G.F.A. van de Walle, IEEE Electron Device Lett., 12(7), 357 (1991)
- [33] M.A.Settler, M.S.Lundstrom, Electron Device Lett., 41(6), 1027(1994)
- [34] R.L. Pritchard, Proc. I.R.E. 43, 1075 (1955)
- [35] J. Lindmayer, Solid-St. Electron., 5, 171 (1962)
- [36] Programmpaket qs-STAT Version 3.2, Q-DAS® Gesellschaft für Datenverarbeitung und Systemtechnik mbH, Balzenbacher Str. 57, 69488 Birkenau, Bundesrepublik Deutschland
- [37] E. Dietrich, A.Schulze, "Statistische Verfahren", (Carl Hanser Verlag München Wien, 1998)

### **3. Experimentelles**

- [1] W. Kern, D. Puotinen, RCA Rev., 31, 187 (1970)
- [2] H. Rücker, Habilitationsschrift, BTU Cottbus (1998)
- [3] persönliche Mitteilung Dr. G. Ritter, IHP
- [4] L. Reimer, Transmission Electron Microscopy, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York (1989)

- [5] M.Grassbauer, H.J. Dudek, M.F.Ebel, Angewandte Oberflächenanalyse mit SIMS, AES und XPS, Akademie-Verlag Berlin (1986)
- [6] J.P. Benedict, R. Anderson, S.J. Klepeis, M.Chaker, Mat. Res. Soc. Symp. Vol. 199, 189, (1990)
- [7] P. Zaumseil, phys. stat. sol. (a) 165, 195 (1998)
- [8] R.N. Kyutt, P.V. Petrashen, L.M. Sorokin, phys. stat. sol. (a) 60, 381 (1980)
- [9] K. Schade, in Mikoelektroniktechnologie, Kapitel 4, 85 (Verlag Technik, Berlin, München, 1991)

#### **4. Epitaxie von Silizium- und SiGe-Schichten**

- [1] D.W. Grewe, R. Misra, R. Strong, T.E. Schlesinger, J. Vac. Sci. Technol. A 12, 979 (1994)
- [2] P.M. Garone, J.C. Sturm, P.V. Schwartz, S.A. Schwarz, B.J. Wilkens, Appl. Phys. Lett., 56, 1275 (1990)
- [3] M. Liehr, C.M. Greenlief, S.R. Kasi, M. Offenberger, , Appl. Phys. Lett., 56, 629 (1990)
- [4] K. Sinniah, M. Sherman, L. Lewis, W. Weinberg, J. Yates, K.C. Janda, Phys. Rev. Lett., 62, 567 (1989)
- [5] J. Murota, Y. Takasawa, H. Fujimoto, K. Goto, T. Matsuura, Y. Sawada, J. de Phys. II, Vol. 5, 1165 (1995)
- [6] S.R. Gunn, J. Phys. Chem., 68, 949, (1964)
- [7] D.W. Grewe, Mat.Science and Engineering, 22, B18 (1993)
- [8] B. Tillack, P.Zaumseil, G. Morgenstern, D.Krüger, G.Ritter, Appl. Phys. Lett., 67(8), 1143 (1995)
- [9] B.Tillack, J.Schlote, G.Ritter, D.Krüger, G.Morgenstern, P.Gaworzewski, J. de Phys. IV, Vol. 5, 1117 (1995)

#### **5. Bewertung von HBT-Parametern und SiGe/Si-Epitaxieverfahren**

- [1] Dr. J. Bauer, Analysealgorithmus für die spektroskopische Ellipsometrie, IHP (1999)
- [2] D.C. Ahlgren, M.Gilbert, D.Greenberg, S.J.Jeng, J.Maliowski et al., IEDM Tech. Dig., 859 (1996)
- [3] A. Pruijmboom, J.W. Slotboom, D.J. Gravesteijn, C.W. Fredriksz, A.A. van Gorkum, R.A. van de Heuvel, J.M.L. van Rooij-Mulder, G.Streutker, G.F.A. van de Walle, IEEE Electron Device Lett., 12(7), 357 (1991)
- [4] D.L. Harame, J.H. Comfort, J.D. Cressler, E.F. Crabbe, Y.-C. Sun, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 42, 3, 455, (1995)
- [5] D. Wolansky, G.G.Fischer, D.Knoll, D.Bolze, B.Tillack, P.Schley, Y.Yamamoto, Proceedings GADEST 2003, Solid State Phenomena, to be published

## **6. Zusammenfassung**

- [1] J.D. Cressler, IEEE Transactions on microwave theory and techniques, 46,(5),572 (1998)
- [2] D.C. Ahlgren, M.Gilbert, D.Greenberg, S.J.Jeng,J.Maliowski et al., IEDM Tech. Dig., 859 (1996)

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen meinen Dank aussprechen, die die Entstehung dieser Arbeit gefördert und ermöglicht haben.

Das Promotionsverfahren zu der vorliegenden Arbeit wurde an der BTU Cottbus durchgeführt. In diesem Zusammenhang möchte ich herzlich Herrn Prof. B. Falter für das mir entgegengebrachte Vertrauen und seine wohlwollende Unterstützung danken.

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IHP Frankfurt (Oder). Die tatkräftige und freundliche Unterstützung von vielen Mitarbeitern dieses Instituts hat wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Insbesondere danke ich dem wissenschaftlichen Geschäftsführer des IHP Herrn Dr. W. Mehr sowie dem ehemaligen Geschäftsführer des IHP Herrn Prof. A. Ourmazd für ihre wohlwollende Förderung und Unterstützung meiner Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. B. Tillack. Durch die langjährige vertrauensvolle Zusammenarbeit hat er es mir ermöglicht, mich in die Epitaxie so einzuarbeiten, daß damit der Grundstein für die vorliegende Arbeit gelegt wurde. Sein ständiges Interesse am Fortschritt dieser Arbeit und die zahlreichen fachlichen Diskussionen waren für mich stets eine unverzichtbare Motivation.

Auf ähnliche Art und Weise habe ich eine große Unterstützung von Dr. D. Knoll erfahren, der jederzeit ein offenes Ohr für fachliche Diskussionen hatte. Besonders wertvoll war seine Betrachtungsweise auf die bewerteten Epitaxieverfahren unter dem Fokus statischer Transistorengrößen.

Prof. H.-J. Osten danke ich für die Diskussionen und Hinweise besonders in den letzten Phasen dieser Arbeit. Als Materialwissenschaftler, der mit dem MBE-Verfahren neuartige Materialien im IHP zum Durchbruch verholfen hat, konnte ich durch den Dialog mit ihm zahlreiche Anregungen für diese Arbeit entnehmen.

Mein Dank gilt Herrn Dr. sc. H. Rücker für die freundliche Übernahme einer Einschätzung der vorliegenden Arbeit.

Ich danke besonders Dr. G. Ritter, der mich mit seinem fachlichen Rat in allen Phasen der Entstehung dieser Arbeit förderte und unterstützte.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei Herrn K. Köpke. Durch die langjährige vertrauensvolle Zusammenarbeit war er für mich ein Partner beim Betrieb der LPCVD- und später bei der RPCVD-Epitaxieanlage. Unsere Diskussionen zu Hardware-, Software- und Prozeßproblemen haben mein Wissen über die Epitaxie vertieft.

Herrn K.-D. Glowatzki danke ich, der mit großem Engagement und Umsicht die epitaktischen Abscheidungen mit den verschiedenen Epitaxieanlagen absolvierte und mit mir Praxisbezogene Diskussionen führte. Ich danke Herrn Glowatzki für die akribische Bewertung der kristallinen Qualität der Epitaxieschichten mittels optischer Mikroskopie.

Des weiteren bedanke ich mich im besonderen bei:

Herrn Dr. P. Zaumseil und Frau G. Dominiak für die Bereitstellung von Ge-Profilen, die mittels des von Dr. Zaumseil geschaffenen Simulationsprogramms für Röntgenbeugungsmessungen ermittelt wurden.

Herrn Dr. D. Krüger und R. Kurps für die Ausführung von SIMS-Messungen.

Herrn Dr. E. Bugiel für die Präparation und Ausführung von TEM-Untersuchungen.

Herrn Dr. P. Schley für Realisierung elektrischer Routine- und Spezialmessungen, sowie der graphischen Datenausgabe mit dem von ihm geschaffenen Programm, die in dieser Arbeit in vielen Abbildungen verwandt wurde.

Den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des IHP-Reinraums für die Präparation von Losen in kontinuierlicher hoher Qualität.

Darüber hinaus bin ich meiner Ehefrau Sibylle und unseren Kindern Jakob und Johannes dankbar für ihre fortwährende Unterstützung und Ermutigung zur Realisierung dieser Arbeit.

## **Zusammenfassung**

In der Arbeit wird untersucht, inwieweit zwei Epitaxieverfahren (LPCVD- und RPCVD-Verfahren) geeignet sind, Bor-dotierte Si/SiGe/Si-Heteroschichtstapel mit guter Homogenität und Reproduzierbarkeit herzustellen. Die Bewertung der Epitaxieverfahren erfolgte anhand von HBT-Parametern, deren Streuungen von Wafer zu Wafer und über den Wafer ermittelt und mit publizierten Referenzdaten des etablierten UHVCVD-Verfahrens verglichen wurden. Die besten Ergebnisse wurden für RPCVD-basierte Si/SiGe/Si-Schichtstapel ermittelt. Schichtstapel beider Epitaxieverfahren haben eine geringe Dichte elektrisch aktiver Defekte. Als kritischer Epitaxieprozeßparameter wurde die Abscheidetemperatur ermittelt. Im Fall des LPCVD-Verfahrens hat die Trägergasgeschwindigkeit einen großen Einfluß auf die Homogenität des Boreinbaus. Mit dieser Arbeit wurde nachgewiesen, daß das RPCVD-Epitaxieverfahren eine Alternative zum etablierten UHVCVD-Verfahren ist.

## **Abstract**

In this thesis it is investigated how far two epitaxial methods (LPCVD and RPCVD) are applicable for the homogeneous and reproducible deposition of boron doped Si/SiGe/Si hetero layer stacks. The methods were evaluated by means of wafer to wafer and within wafer spread of HBT parameters as well as by comparison of these data with published data of the established UHVCVD epitaxial method. The best results were achieved for RPCVD based Si/SiGe/Si-layer stacks. It was found that layer stacks of both investigated epitaxial methods possess low densities of electrically active defects. The most critical process parameter is the deposition temperature. The carrier gas velocity influenced strongly the boron incorporation in the case of the LPCVD reactor. In result of this thesis it was found that the RPCVD method is an alternative to the established UHVCVD method.